



SKRIPSI – ME141501

**ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP  
PERFORMANSI MOTOR *BOW THRUSTER* DI KAPAL BERDASARKAN  
ATURAN IEC MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI**

Regita Indar Wardani  
NRP. 04211440000023

Dosen Pembimbing  
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.  
Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



*UNDERGRADUATE THESIS – ME141501*

***ANALYSIS OF UNBALANCED VOLTAGES OF BOW THRUSTER MOTOR  
PERFORMANCE IN THE SHIP BASED ON IEC REGULATION USING  
SIMULATION SOFTWARE***

Regita Indar Wardani  
NRP. 04211440000023

*Supervisor*

Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.  
Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.

*DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
Faculty of Marine Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2018*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP  
PERFORMANSI MOTOR *BOW THRUSTER* DI KAPAL BERDASARKAN  
ATURAN IEC MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI**

### SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

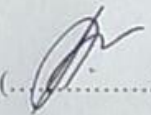
Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Regita Indar Wardani**  
NRP. 0421144000023

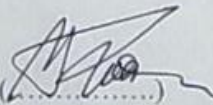
Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.  
NIP. 1960 0319 1987 01 1001



(.....)

Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc  
NIP. 1968 0701 1995 12 1001



(.....)

SURABAYA  
JULI 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP  
PERFORMANSI MOTOR *BOW THRUSTER* DI KAPAL BERDASARKAN  
ATURAN IEC MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI**

### **SKRIPSI**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System* (MEAS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Regita Indar Wardani**  
NRP. 04211440000023

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



# **ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMANSI MOTOR *BOW THRUSTER* DI KAPAL BERDASARKAN ATURAN IEC MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI**

**Nama Mahasiswa** : Regita Indar Wardani  
**NRP.** : 04211440000023  
**Departemen** : Teknik Sistem Perkapalan  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.  
Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc

## **ABSTRAK**

*Secara umum, penggunaan motor induksi tiga fasa sering digunakan pada bidang maritim. Salah satu, penerapan motor induksi tiga fasa yaitu pada motor listrik bow thruster di kapal. Penggunaan motor induksi tiga fasa pada bow thruster dikarenakan bentuknya yang sederhana namun memiliki konstruksi yang kuat, dan biaya yang rendah. Motor ini digunakan untuk menggerakkan baling-baling kapal sebagai pendorong bantu yang digunakan untuk maneuver kecepatan rendah, transversal, yang ditempatkan di haluan kapal. Kinerja motor bow thruster mempunyai kaitan yang erat dengan kualitas tegangan yang disuplai dan tegangan yang keluar dari motornya. Apabila tegangan yang disuplai dan tegangan yang keluar dari motornya mempunyai kualitas yang buruk, maka kinerja dari motor akan terganggu. Beberapa penyebab penurunan kualitas tegangan disebabkan oleh ketidakseimbangan tegangan pada motor bow thruster. Ketidakseimbangan tegangan terjadi akibat dari tegangan suplai yang tidak seimbang dan jumlah lilitan salah satu stator yang berkurang atau rusak dikarenakan kurang perawatan dan buruknya lingkungan sekitar motor. Pada pembahasan ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak matlab/Simulink untuk melihat pengaruh enam kondisi ketidakseimbangan tegangan yang terjadi di kapal terhadap performansi motor bow thruster dengan variasi faktor ketidakseimbangan tegangan berdasarkan true definition IEC. Setelah dianalisa pada kondisi steady state (tunak) terlihat bahwa adanya perbedaan pengaruh dari setiap kondisi ketidakseimbangan tegangan. Pada factor ketidakseimbangan 5% kondisi undervoltage 3 phase memiliki daya keluaran terkecil 22321.59 watt dengan torsi terkecil 142.9039 Nm, namun memiliki power factor 0.762326 yang power faktornya masih diperbolehkan oleh aturan IEC.*

**Kata kunci** : Motor Induksi tiga fasa, Motor Bow Thruster, Ketidakseimbangan tegangan, True Definition IEC.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# **ANALYSIS OF UNBALANCED VOLTAGES OF BOW THRUSTER MOTOR PERFORMANCE IN THE SHIP BASED ON IEC REGULATION USING SIMULATION SOFTWARE**

**Name** : **Regita Indar Wardani**  
**NRP.** : **04214100023**  
**Department** : **Marine Engineering**  
**Supervisor** : **Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.**  
**Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc**

## **ABSTRACT**

*In general, the use of three-phase induction motors is often used in the maritime field. One, the application of three-phase induction motor is bow thruster electric motor on the ship. The use of a three-phase induction motor on the bow thruster because is due to its simple shape but has strong construction, and low cost. This motor is used to drive the ship's propeller as an auxiliary booster used for low-speed, transversal maneuvers, which are located in the bow of the ship. The performance of the bow thruster motor is closely related to the quality of the supplied voltage and the voltage coming out of the motor. If the voltage supplied and the voltage out of the motor has a poor quality, then the performance of the motor will be disrupted. Some of the causes of quality degradation are caused by an imbalance of voltage on the bow thruster motor. Voltage imbalance occurs as a result of an unbalanced supply voltage and the amount of winding one of the stator is reduced or damaged due to poor maintenance and poor environment around the motor. In this discussion, simulations were performed using matlab / simulink software to see the effect of six conditions of ship imbalance on vessel to bow thruster motor performance with variation of voltage imbalance factor based on true definition of IEC. After analyzed under steady state is seen that there is difference of influence from every condition of unbalance voltage. In the 5% imbalance factor the under voltage 3 phase has the smallest output power of 22321.59 watt with the smallest torque of 142.9039 Nm, but has a power factor of 0.762326 whose power factor is still permitted by IEC rules.*

**Keywords:** **3-phases Induction Motor, Bow Thruster Motor, Unbalanced Voltages, True Definition IEC.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Performansi Motor Bow Thruster di Kapal Berdasarkan Aturan Iec Menggunakan Perangkat Lunak SimulasI”.

Penulisan tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam menyelesaikan skripsi ini berdasarkan kepada dasar teori yang diperoleh dalam perkuliahan studi literature dan dosen pembimbing yang terus memberikan masukan serta pihak – pihak lain yang terlibat. Banyak pihak yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Maka pada kesempatan kali penulis mengucapkan terima kasih sebesar – besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yang senantiasa yang senantiasa memberikan dukungan moral dan materil kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Dr.Eng M. Badruz Zaman, S.T, M.T sebagai kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
3. Bapak Ir. Sardono Sarwito M.Sc selaku dosen pembimbing pertama yang terus memberikan saran dan masukan kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.selaku dosen pembimbing kedua yang terus memberikan saran dan masukan kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
5. Teman-teman member Laboratorium Listrik dan Otomasi Kapal yang telah banyak membantu untuk memberikan saran dan masukan guna peyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam melakukan penulisan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kelancaran dan perbaikan dalam pengerjaan tugas akhir kedepannya.

Akhir kata semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 15 Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
ABSTRAK .....	v
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR GRAFIK .....	xvii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	2
1.5. Manfaat.....	3
BAB II .....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Motor Induksi 3 Fasa.....	5
2.2. Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa .....	5
2.3. Komponen-Komponen Simetris.....	6
2.4. Motor Listrik <i>Bow Thruster</i> .....	7
2.5. Ketidakseimbangan Tegangan.....	9
2.6. Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan .....	9
2.7. Definisi Faktor Ketidakseimbangan Tegangan menurut NEMA dan IEEE .....	9
2.8. Aturan Ketidakseimbangan Berdasarkan IEC.....	11
2.9. Analisis Steady State .....	11
2.10. Medan Putar Magnetic oleh Arus 3-Fase .....	13
2.11. <i>Maxwell Inductance Bridge</i> .....	14
2.12. Perangkat Lunak Matlab .....	17
BAB III.....	19
METODOLOGI .....	19
3.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	19
3.2. Studi Literatur.....	19
3.3. Pengumpulan Data .....	19
3.4. Perhitungan Parameter Bow Thruster .....	20
3.5. Simulasi Menggunakan Matlab Simulink .....	20
3.6. Validasi Hasil Simulasi .....	22
3.7. Analisa dan Pembahasan .....	22
3.8. Kesimpulan dan Saran.....	22
3.8 Flow Chart.....	23
BAB IV .....	25
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Spesifikasi motor <i>bow thruster</i> .....	25
4.2 Parameter Motor Bow Thruster.....	25
4.3 Simulasi.....	28

4.4	Perhitungan Data .....	45
4.5	Analisa Tabel Perhitungan.....	46
BAB V	.....	57
KESIMPULAN	.....	57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	.....	59
LAMPIRAN	.....	61
BIODATA PENULIS	.....	94



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Motor induksi tiga fasa .....	5
Gambar 2. Diagram Fasor Komponen Urutan Positif .....	6
Gambar 3. Diagram Fasor Komponen Urutan Negatif .....	7
Gambar 4. Diagram Fasor Komponen Urutan Nol .....	7
Gambar 5. Bow Thruster dengan Penggerak Motor Listrik .....	8
Gambar 6. Hubungan antara <i>true definition</i> ketidakseimbangan tegangan dan definisi NEMA untuk 2%, 5%, 10% dan 20% dari ketidakseimbangan NEMA .....	10
Gambar 7. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Urutan Positif (Sumber: Ahmad Munthasir, 2014) .....	11
Gambar 8. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Urutan Negatif (Sumber: Ahmad Munthasir, 2014) .....	11
Gambar 9. Belitan terpisah secara listrik sebesar $120^0$ .....	13
Gambar 10. Fluks yang dibangkitkan oleh arus .....	14
Gambar 11. <i>Maxwell Bridges</i> (Sumber: Theraja B.L., 2005) .....	15
Gambar 12. <i>Maxwell Bridges</i> (Sumber: Theraja B.L., 2005) .....	16
Gambar 19. Flowchart Simulasi Matlab .....	21
Gambar 20. Rangkaian simulasi .....	21
Gambar 21. Rangkaian <i>Maxwell Inductance Wien Bridges</i> (Sumber: Foto dari Laboratorium MEAS) .....	25
Gambar 22. Segitiga Daya (Sumber: Theraja B.L., 2005) .....	26
Gambar 23. AC Voltage Source (Sumber: Matlab R2014a) .....	28
Gambar 24. Blok parameter AC Voltage Source (Sumber: Matlab R2014a) .....	29
Gambar 25. <i>Three Phase V-I Measurement</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	29
Gambar 26. Blok parameter <i>Three Phase V-I Measurement</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	30
Gambar 27. Blok <i>Power (3ph, Instantaneous)</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	30
Gambar 28. Blok <i>Asynchronous Machine SI Units</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	31
Gambar 29. Blok Parameter Konfigurasi <i>Asynchronous Machine SI Units</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	31
Gambar 30. Blok Parameter Konfigurasi <i>Asynchronous Machine SI Units</i> (Sumber: Matlab R2014a) .....	32
Gambar 31. Simulasi Kondisi Seimbang .....	33

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Aturan IEC .....	11
Tabel 2. Parameter Motor <i>bow thruster</i> yang dibutuhkan.....	19
Tabel 3. Hasil Simulasi pada Kondisi Tegangan Seimbang.....	33
Tabel 4. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 1% .....	34
Tabel 5. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 1% .....	35
Tabel 6. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 2% .....	35
Tabel 7. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 2% .....	36
Tabel 8. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 3% .....	36
Tabel 9. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 3% .....	37
Tabel 10. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 4% .....	37
Tabel 11. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 4% .....	38
Tabel 12. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 5% .....	38
Tabel 13. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 5% .....	39
Tabel 14. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 1% .....	39
Tabel 15. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 2% .....	40
Tabel 16. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 3% .....	40
Tabel 17. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 4% .....	41
Tabel 18. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 5% .....	41
Tabel 19. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Putaran Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan).....	42
Tabel 20. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Sudut Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan).....	43
Tabel 21. Hasil perhitungan untuk VUF 1% di Beberapa Kondisi .....	46
Tabel 22. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 2% di Beberapa Kondisi .....	47
Tabel 23. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 3% di Beberapa Kondisi .....	48
Tabel 24. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 4% di Beberapa Kondisi .....	49
Tabel 25. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 5% di Beberapa Kondisi .....	50
Tabel 26. Hubungan antara Nilai Arus Hasil Simulasi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi .....	51
Tabel 27. Hubungan antara Nilai Arus Hasil Perhitungan terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi .....	51
Tabel 28. Rata-rata nilai Error Arus Stator .....	52
Tabel 29. Hubungan antara Daya Keluaran terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi .....	52

Tabel 30. Hubungan antara Torsi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi .....	54
---	----

## **DAFTAR GRAFIK**

Grafik 1. Hubungan antara Putaran Motor terhadap Berbagai Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan .....	42
Grafik 2. Hubungan antara Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Sudut Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan).....	44
Grafik 3. Hubungan Daya Keluaran Motor dengan Berbagai Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan .....	53
Grafik 4. Hubungan antara Torsi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi.....	54

“Halaman ini sengaja dikosongkan”







# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Motor induksi merupakan suatu motor listrik yang sering digunakan pada bidang perindustrian dan bidang maritim. Motor induksi mempunyai dua tipe berdasarkan jumlah fasanya, yaitu: motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa. Secara umum, penggunaan motor induksi tiga fasa sering digunakan pada bidang maritim. Salah satu, penerapan motor induksi tiga fasa yaitu pada motor listrik bow thruster di kapal. Penerapan motor induksi tiga fasa pada bow thruster dikarenakan bentuknya yang sederhana namun memiliki konstruksi yang kuat, dan biaya yang rendah. Motor ini digunakan untuk menggerakkan baling-baling kapal sebagai pendorong bantu yang digunakan untuk manuever kecepatan rendah, transversal, yang ditempatkan di haluan kapal.

Kinerja motor bow thruster mempunyai kaitan yang erat dengan kualitas tegangan yang disuplai dan tegangan yang keluar dari motornya. Jika tegangan yang disuplai dan tegangan yang keluar dari motornya mempunyai kualitas yang baik, maka motor tersebut dapat bekerja secara optimal. Sebaliknya apabila tegangan yang disuplai dan tegangan yang keluar dari motornya mempunyai kualitas yang buruk, dan menyebabkan kinerja dari motor akan terganggu. Salah satu penyebab menurunnya kualitas tegangan disebabkan oleh Ketidakseimbangan tegangan pada motor bow thruster.

Ketidakseimbangan tegangan merupakan suatu kondisi ketiga tegangan pada fasa R, S, T motor mengalami ketidakseimbangan nilai tegangan antara satu fasa dengan fasa lainnya dikarenakan beberapa faktor yang membuat perbedaan nilai tegangan yang cukup signifikan antar fasa lainnya. Ketidakseimbangan tegangan juga dapat didefinisikan adanya perbedaan nilai sudut fasa yang tidak sesuai dengan nilai beda antar sudut fasa yang masing-masing bernilai  $120^0$ . Ketidakseimbangan tegangan terjadi akibat dari tegangan suplai yang tidak seimbang dan jumlah lilitan salah satu stator yang berkurang atau rusak dikarenakan kurang perawatan dan buruknya lingkungan sekitar motor. Oleh karena itu muncullah faktor ketidakseimbangan tegangan yang dijelaskan pada True Definition IEC atau disebut juga VUF (Voltage Unbalance Factor) sebagai acuan untuk menentukan seberapa besar ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada suatu sistem.

Pada pembahasan ini, tidak hanya membahas ketidakseimbangan tegangan pada motor bow thruster berdasarkan faktor ketidakseimbangan tegangannya melainkan juga membahas berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan. Kondisi ketidakseimbangan tegangan di kapal terdapat enam kondisi yang mempengaruhi nilai ketidakseimbangan tegangan. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak simulasi untuk melihat pengaruh enam kondisi ketidakseimbangan tegangan yang terjadi di kapal terhadap performansi motor bow thruster dengan variasi faktor ketidakseimbangan tegangan berdasarkan true definition IEC. Sebelum dilakukan simulasi diperlukan beberapa pendekatan untuk mendapatkan parameter motor.

### 1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian di atas maka rumusan masalah dari tugas akhir ini yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor *Bow Thruster* di kapal?
2. Bagaimana hubungan ketidakseimbangan tegangan dengan variasi faktor ketidakseimbangan tegangan pada motor *Bow Thruster* di kapal?
3. Bagaimana hubungan ketidakseimbangan tegangan dengan enam kondisi ketidakseimbangan pada motor *bow thruster* di kapal?
4. Bagaimana hubungan antara variasi ketidakseimbangan tegangan dengan enam kondisi ketidakseimbangan tegangan pada motor *Bow Thruster* di kapal?

### 1.3. Batasan Masalah

Simulasi yang dilakukan hanya untuk mengetahui pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap performansi motor *bow thruster* dengan berbagai variabel:

1. Berdasarkan variasi faktor ketidakseimbangan tegangan *true definition* IEC yaitu: 2%, 3%, 4%, 5%
2. Berdasarkan enam kondisi ketidakseimbangan tegangan dikapal yaitu: satu fasa tegangan lebih rendah dari tegangan nominal, dua fasa tegangan lebih rendah dari tegangan nominal, tiga fasa tegangan lebih rendah dari tegangan nominal, satu fasa tegangan lebih besar dari tegangan nominal, dua fasa tegangan lebih besar dari tegangan nominal, dan tiga fasa tegangan lebih besar dari tegangan nominal.
3. Berdasarkan analisa *steady state* rangkaian ekivalen Motor Induksi tiga fasa urutan positif dan urutan negatif
4. Performansi motor hanya mencakup putaran motor, torsi, daya masukan, kecepatan sudut dan power faktor

### 1.4. Tujuan

Adapun penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mendapatkan dan memahami pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor *bow thruster* di kapal pada kondisi *undervoltage*
2. Mendapatkan dan memahami pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor *bow thruster* di kapal pada kondisi *overvoltage*
3. Mendapatkan dan memahami hubungan faktor daya terhadap faktor ketidakseimbangan tegangan dengan enam kondisi ketidakseimbangan tegangan pada motor *Bow Thruster* di kapal beserta saran perbaikan

### **1.5. Manfaat**

Manfaat yang dapat diperoleh dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Dapat mengetahui dan memahami performansi motor *bow thruster* di kapal akibat pengaruh ketidakseimbangan tegangan dengan variasi nilai faktor ketidakseimbangan pada enam kondisi ketidakseimbangan tegangan
2. Sebagai referensi teknis untuk keperluan akademik
3. Sebagai referensi teknis untuk keperluan penelitian dan pengembangan di masa mendatang

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

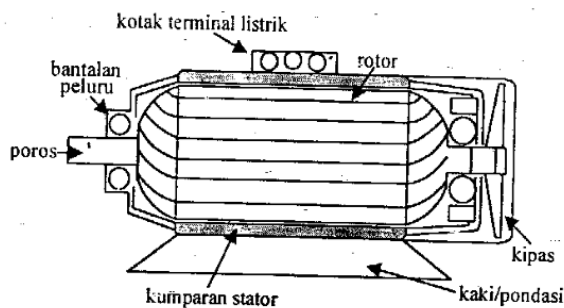
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik (ac) yang sering digunakan pada bidang perindustrian dan bidang maritim. Alasan penggunaan motor induksi di berbagai bidang, dikarenakan beberapa keuntungan, yaitu:

1. Bentuk motor yang sederhana namun memiliki konstruksi yang cukup kuat.
2. Biaya perawatannya murah dan dapat diandalkan dengan baik.
3. Memiliki efisiensi tinggi dan pada keadaan normal motor, tidak membutuhkan sika sehingga dapat mengurangi rugi-rugi gesekan. Hal ini juga menjadi pembeda motor induksi dengan motor arus searah
4. Perawatan motor minum dan ketika motor mulai beroperasi tidak memerlukan tambahan peralatan khusus.

Motor induksi merupakan motor yang mana arus rotornya hasil dari induksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi mempunyai dua tipe berdasarkan jumlah fasanya, yaitu: motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa. Dibawah ini merupakan Gambar 1. Motor induksi tiga fasa



Gambar 1. Motor induksi tiga fasa  
(Sumber : Wijaya Mochtar, 2001)

### 2.2. Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Ada beberapa prinsip kerja motor induksi (Zuhal,1988):

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan

$$n_s = 120 f/p \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

$n_s$  = kecepatan stator

$f$  = frekuensi

$p$  = jumlah pole

2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor,

3. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar:

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_m \text{ untuk setiap fasanya} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

$E$  = Tegangan induksi pada rotor dalam keadaan diam (Volt)

$N$  = Jumlah lilitan kumparan rotor

$\phi$  = Fluks Maksimum (Wb)

4. Karena kumparan rotor merupakan rangkainya yang tertutup, maka ggl  $\epsilon$  akan menghasilkan arus
5. Adanya arus ( $I$ ) di dalam medan magnet menimbulkan gaya ( $F$ ) pada rotor
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor yang cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan stator
7. Seperti telah dijelaskan pada kondisi nomor tiga, tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relative antara kecepatan medan putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ )
8. Perbedaan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut slip ( $S$ ) dinyatakan dengan:  

$$S = (n_s - n_r)/n_s \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

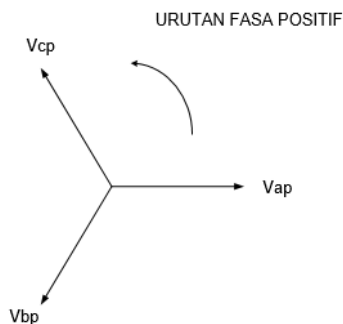
$n_s$  = kecepatan stator

$n_r$  = kecepatan rotor
9. Bila  $n_r = n_s$ , tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila  $n_r$  lebih kecil dari  $n_s$
10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor takserempak atau asinkron

### 2.3. Komponen-Komponen Simetris

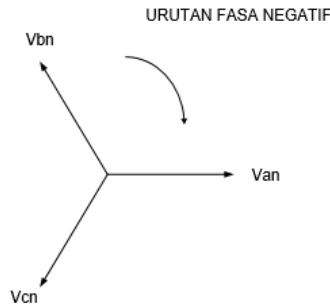
Sistem tiga fasor yang tidak seimbang dari sistem tiga fasor dapat dibagi menjadi kedalam tiga sistem fasor seimbang yang disebut (C.L Fortescue, 1918):

1. Komponen urutan positif. Pada sistem tiga fasor, komponen urutan positif terdiri dari tiga buah fasor yang sama besarnya, terpisah antara satu dengan yang lain sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasor yang sama dengan fasor aslinya seperti yang terlihat pada Gambar 2. Diagram Fasor Komponen Urutan Positif



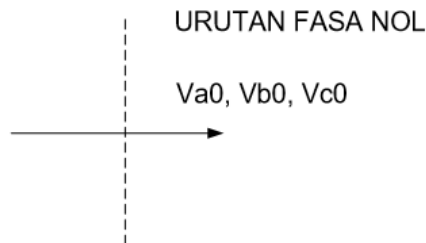
Gambar 2. Diagram Fasor Komponen Urutan Positif  
(Sumber: Stevenson W.D, 1983)

2. Komponen urutan negatif. Pada sistem tiga fasa, komponen urutan negative terdiri dari tiga buah fasor yang sama besarnya, terpisah antara satu dengan yang lain sebesar  $120^\circ$  dan mempunyai urutan fasor yang berlawanan dengan fasor aslinya seperti yang terlihat pada Gambar 3. Diagram Fasor Komponen Urutan Negatif



Gambar 3. Diagram Fasor Komponen Urutan Negatif  
(Sumber: Stevenson W.D, 1983)

3. Komponen urutan nol pada sistem tiga fasa, komponen urutan nol terdiri dari tiga buah fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa  $0^\circ$  antara fasor yang satu dengan yang lain seperti yang terlihat pada Gambar 4. Diagram Fasor Komponen Urutan Nol.



Gambar 4. Diagram Fasor Komponen Urutan Nol

Sehingga besar tegangan sebenarnya dari setiap fasa adalah penjumlahan dari masing-masing komponen simetris terbentuk persamaan (4), (5), dan (6):

$$V_a = V_{a0} + V_{ap} + V_{an} \dots\dots\dots (4)$$

$$V_b = V_{bp} + V_{bn} + V_{b0} = a^2 V_{ap} + a V_{an} + V_{a0} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_c = V_{cp} + V_{cn} + V_{c0} = a V_{ap} + a^2 V_{an} + V_{a0} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana  $a = 1 \angle 120^\circ$  yang digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar  $120^\circ$  dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam.

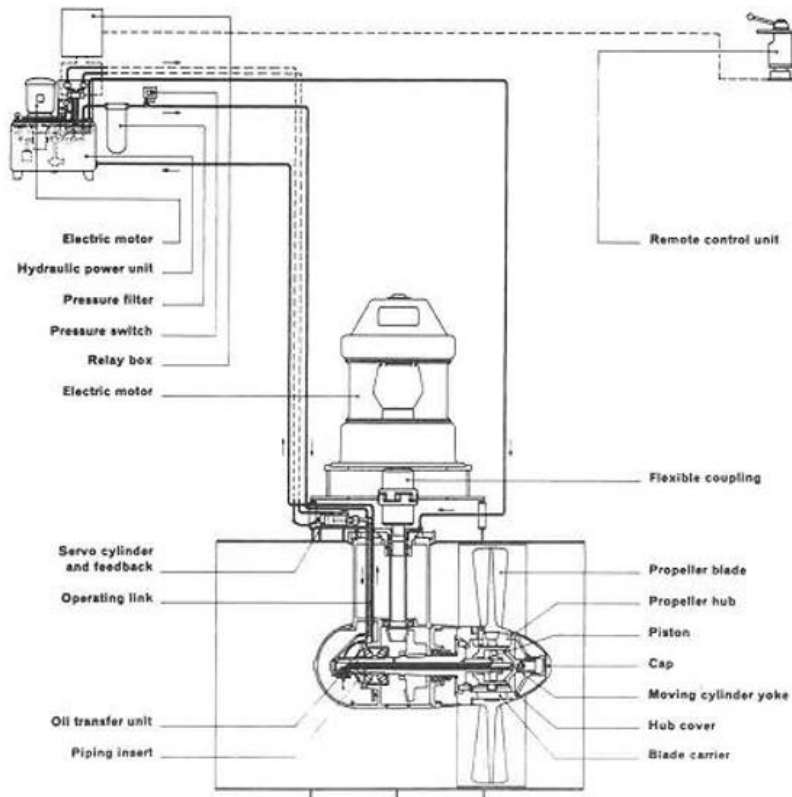
#### 2.4. Motor Listrik *Bow Thruster*

Bow Thruster adalah suatu alat yang dipasang pada kapal - kapal tertentu untuk membantu manuver kapal. Pada saat manuver kapal dilakukan, posisi kapal amatlah sulit untuk melakukan arah gerak yang diameternya efisien. Sehingga dibutuhkan alat pendorong ini agar diameter manuver kapal dapat diperkecil yang menghasilkan efisien putaran manuver

yang besar. Unit pendorong tersebut terdiri dari suatu propeller atau baling - baling yang berada dalam satu terowongan (tunnel) pada bagian melintang kapal dan dilengkapi dengan suatu alat bantu seperti motor hidrolik atau elektrik. (Maulana Imam, 2010)

Motor Elektrik penggerak bow thruster merupakan motor dengan suplai daya dan tegangan yang berasal dari auxiliary engine atau generator kapal. Pada dasar, motor listrik penggerak bow thruster dapat menggunakan motor DC untuk daya dan diameter propeller yang kecil dan motor induksi tiga fasa untuk daya dan diameter propeller yang besar. Umumnya untuk motor bow thruster ini menggunakan standard gear driven dengan jenis motor induksi tiga fasa sangkar tupai. Dibawah ini gambar 2. bow thruster dengan penggerak motor listrik

Motor induksi tiga fasa bow thruster membutuhkan suplai ketiga tegangan yang seimbang dengan tegangan nominal yang dibutuhkan motornya. Tegangan suplai tiga fasa yang tidak seimbang dapat mempengaruhi kinerja dari motor. Selain itu apabila belitan stator rusak dan kurang baik karena kondisi perawatan yang buruk dan kondisi lingkungan motor yang buruk akan mengakibatkan terjadinya ketidakseimbangan tegangan pada motor. Ketidakseimbangan tegangan akan mempengaruhi kinerja motor bow thruster.



Gambar 5. Bow Thruster dengan Penggerak Motor Listrik  
(Sumber: Maulana Imam, 2010)



## 2.5. Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan merupakan suatu kondisi dimana ketiga fasa tegangan bernilai tidak sama satu dengan lainnya dan tidak sesuai dengan tegangan nominalnya. Kondisi ketidakseimbangan tegangan dapat mempengaruhi kinerja motor ataupun peralatan listrik yang lainnya. Oleh karena itu, banyak mengamati dan menganalisa ketidakseimbangan tegangan. Ketidakseimbangan tegangan dapat terjadi ketika tegangan generator di kapal yang dibangkitkan bernilai seimbang akan tetapi pengaruh dari pembebanan yang tidak seimbang pada saat pendistribusian listrik di kapal akan menyebabkan tegangan yang sampai ke beban/peralatan listrik menjadi tidak seimbangan. Penyebab lainnya adalah kumparan pada stator rusak akibat kurangnya perawatan dan kondisi lingkungan motor yang buruk.

## 2.6. Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan

Ada beberapa kondisi yang diakibatkan oleh ketidakseimbangan tegangan. Di perindustrian darat terjadi delapan kondisi ketidakseimbangan tegangan, namun untuk permasalahan dikapal hanya ada enam kondisi ketidakseimbangan tegangan, yaitu:

a. 1Ø–UV (Single Phase Under Voltage Unbalance)

Kondisi yang mana salah satu fasa dari sistem tiga fasa bertegangan yang bernilai lebih rendah dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

b. 2Ø–UV (Two Phase Under Voltage Unbalance)

Kondisi yang mana dua fasa dari sistem tiga fasa bertegangan yang bernilai lebih rendah dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

c. 3Ø–UV (Three Phase Under Voltage Unbalance)

Kondisi dimana tegangan dari ketiga fasa tegangan bernilai tidak seimbang dan nilai tersebut lebih rendah dari tegangan nominalnya

d. 1Ø–OV (Single Phase Over Voltage Unbalance)

Kondisi yang mana salah satu fasa dari sistem tiga fasa bertegangan yang bernilai lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

e. 2Ø–OV (Two Phase Over Voltage Unbalance)

Kondisi yang mana dua fasa dari sistem tiga fasa bertegangan yang bernilai lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

f. 3Ø–OV (Three Phase Over Voltage Unbalance)

Kondisi dimana tegangan dari ketiga fasa tegangan bernilai tidak seimbang dan nilai tersebut lebih tinggi dari tegangan nominalnya

## 2.7. Definisi Faktor Ketidakseimbangan Tegangan menurut NEMA dan IEEE

Ada ketiga definisi dari ketidakseimbangan tegangan dibawah ini:(P. Pillay et. All, 2001)

a. Definisi dari NEMA (*National Equipment Manufacturer's Association*) yang dimana diketahui sebagai faktor ketidakseimbangan tegangan line (LVUR), yaitu:

$$\%LVUR = \frac{\text{deviasi maks tegangan dari rata-rata tegangan line}}{\text{rata-rata tegangan line}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\%LVUR = \frac{\text{Max } [|V_{ab} - V_{avg}| \times |V_{bc} - V_{avg}| \times |V_{ca} - V_{avg}|]}{V_{avg}}$$

$$\text{dimana } V_{avg} = (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) / 3$$

Definisi NEMA mengasumsikan bahwa rata-rata tegangan adalah selalu sama dengan nilainya, dimana tegangan 480 V untuk sistem tiga fasa amerika dan bekerja hanya dengan magnitude, untuk sudut fasanya tidak termasuk.

- b. Definisi dari IEEE juga diketahui sebagai faktor ketidakseimbangan tegangan fasa (PVUR), yaitu:

$$\%PVUR = \frac{\text{deviasi maks tegangan dari rata-rata tegangan fasa}}{\text{rata-rata tegangan fasa}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\%PVUR = \frac{\text{Max } [|Va - Vavg| \times |Vb - Vavg| \times |Vc - Vavg|]}{Vavg}$$

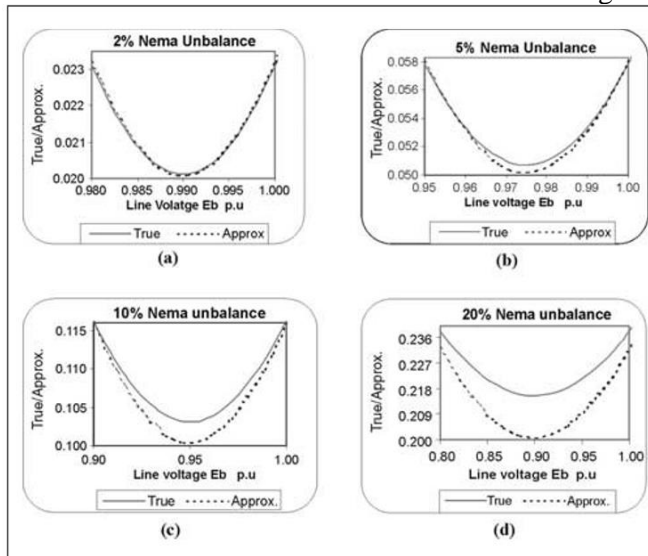
dimana  $Vavg = (Va + Vb + Vc) / 3$

Definisi IEEE nyaris sama dengan definisi NEMA yang membedakan adalah jenis tegangan yang digunakan sebagai faktor ketidakseimbangan tegangan. Untuk definisi IEEE menggunakan tegangan fasa dan untuk definisi NEMA menggunakan tegangan line

- c. *True Definition* dari IEC didefinisikan sebagai persentase faktor ketidakseimbangan (%VUF) yang diperoleh dari perbandingan antara tegangan komponen negatif ( $V_n$ ) dengan tegangan komponen positif ( $V_p$ ), yaitu:

$$\%VUF = \frac{\text{tegangan komponen negative } (V_n)}{\text{tegangan komponen positif } (V_p)} \dots\dots\dots (9)$$

Berikut ini merupakan gambar 3. Hubungan antara *true definition* ketidakseimbangan beban dan definisi NEMA untuk 2% dan 5% dari ketidakseimbangan NEMA



Gambar 6. Hubungan antara *true definition* ketidakseimbangan tegangan dan definisi NEMA untuk 2%, 5%, 10% dan 20% dari ketidakseimbangan NEMA  
(Sumber: P. Pillay et. all, 2001)

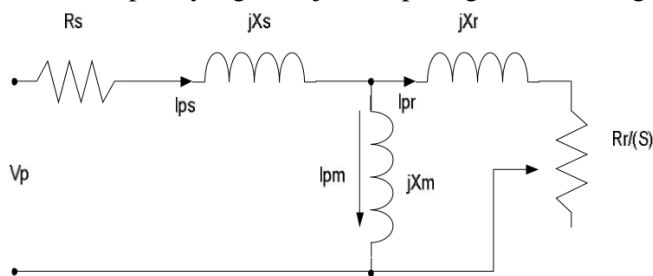
## 2.8. Aturan Ketidakseimbangan Berdasarkan IEC

Aturan yang digunakan sebagai acuan untuk mengetahui terjadinya ketidakseimbangan pada motor *bow thruster* yang dapat diterima / tidak dalam penelitian ini adalah IEC (*International Electrotechnical Commission*). Aturan IEC telah mengatur banyak hal yang berhubungan dengan instalasi listrik dan peralatan listrik seperti persyaratan yang harus di desain/diterapkan pada instalasi berkaitan dengan efisiensi listrik. Salah satu bagian yang diatur oleh IEC adalah kualitas tegangan pada sebuah instalasi listrik dan peralatan listrik. Kualitas tegangan yang dimaksud adalah ketidakseimbangan tegangan pada instalansi listrik dan peralatan listrik. Pada IEC/ TR 61000-3-14 *chapter 10-Unbalance Emission Limits for unbalanced installation LV systems* ditunjukkan pada tabel 1 dibawah ini: Tabel 1. Aturan IEC

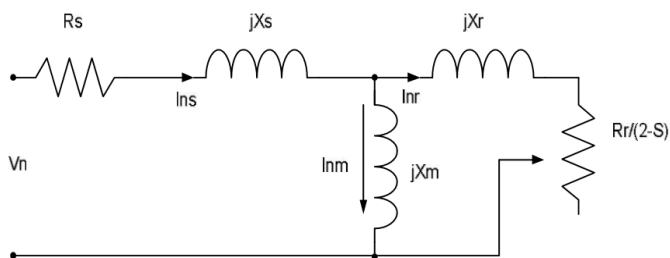
Type of installation	Lighting %	Other uses %
A – Low voltage installations supplied directly from a public low voltage distribution system	3	5

## 2.9. Analisis Steady State

Analisis steady state dari sebuah operasi motor induksi tiga fasa dengan suplai tegangan tidak seimbang dilakukan dengan menggunakan pendekatan komponen simetris dengan rangkaian ekivalen seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 dan gambar 7



Gambar 7. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Urutan Positif  
(Sumber: Ahmad Munthasir, 2014)



Gambar 8. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Urutan Negatif  
(Sumber: Ahmad Munthasir, 2014)

Misalkan tegangan fasa dari motor adalah  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , maka dapat dibuat suatu matrik persamaan hubungan antar komponen urutan positif, negative dan nol seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Dimana  $a = -0.5 + 0.86603i$ , dan  $a^2 = -0.5 - 0.86603i$ .....(10)

Analisis dari rangkaian ekuivalen pada Gambar 4 dan 5 didapat Persamaan (11) dan (12) untuk impedansi urutan positif ( $Z_p$ ) dan impedansi urutan negatif ( $Z_n$ ):

$$Z_p = R_s + jX_s + \frac{(jX_m)(\frac{R_r}{s} + jX_r)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots (11)$$

$$Z_n = R_s + jX_s + \frac{(jX_m)(\frac{R_r}{2-s} + jX_r)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots (12)$$

Parameter yang diperlukan untuk perhitungan ini adalah tahanan stator ( $R_s$ ), tahanan rotor ( $R_r$ ), reaktansi stator ( $X_s$ ), rotor ( $X_r$ ) dan reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ). Karena motor dihubungkan dengan hubungan wye tiga kawat dan tidak ditanahkan maka urutan nol dari tegangan maupun arus tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, arus urutan positif stator ( $I_{ps}$ ) dan rotor ( $I_{pr}$ ) serta arus urutan negatif stator ( $I_{ns}$ ) dan rotor ( $I_{nr}$ ) yang mengalir adalah seperti yang diperlihatkan pada Persamaan (13) hingga (16). Untuk analisa pada rangkaian ekuivalen motor induksi urutan positif:

$$I_{ps} = \frac{V_p}{Z_p} \dots\dots\dots (13)$$

$$I_{pr} = I_{pr} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk analisa pada rangkaian ekuivalen motor induksi urutan negatif:

$$I_{ns} = \frac{V_n}{Z_n} \dots\dots\dots (15)$$

$$I_{nr} = I_{ns} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots (16)$$

Persamaan (13) dan (14) merupakan persamaan arus stator dan rotor urutan positif dan Persamaan (15) dan (16) merupakan persamaan arus stator dan rotor urutan negatif. Sehingga didapat persamaan arus pada tiap fasa ( $I_{as}$ ,  $I_{bs}$ ,  $I_{cs}$ ):

$$I_{as} = (I_{ps} + I_{ns}) : 3 \dots\dots\dots (17)$$

$$I_{bs} = (a^2 I_{ps} + a I_{ns}) : 3 \dots\dots\dots (18)$$

$$I_{cs} = (a I_{ps} + a^2 I_{ns}) : 3 \dots\dots\dots (19)$$

Daya input motor terdiri dari daya aktif dan Daya reaktif ( $P_{in}$ ,  $Q_{in}$ ) dan faktor daya ( $\cos\phi$ ) motor dapat dihitung dengan menggunakan komponen simetris arus dan tegangan dengan Persamaan (20) sampai dengan (22)

$$P_{in} = \text{Re} [3 (V_p \cdot I_{ps}^* + V_n \cdot I_{ns}^*)] \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_{in} = \text{Im} [3 (V_p \cdot I_{ps}^* + V_n \cdot I_{ns}^*)] \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{faktor daya} = \cos[ \tan^{-1} (\frac{Q_{in}}{P_{in}}) ] \dots\dots\dots (22)$$

Dimana tanda (\*) bermakna nilai konjugat

Jika rugi-rugi inti dan mekanis diabaikan, daya keluaran dari motor ditunjukkan dengan Persamaan (23) sampai dengan (25)

$$P_p = 3 I_{pr}^2 \times \left( \frac{1-s}{s} \right) R_r \dots\dots\dots (23)$$

$$P_n = 3 I_{nr}^2 \times \left( \frac{s-1}{2-s} \right) R_r \dots\dots\dots (24)$$

$$P_{out} = P_p + P_n \dots\dots\dots (25)$$

Dimana  $P_n$  pada keadaan normal adalah bernilai negatif karena rotor berputar pada arah yang berlawanan dengan medan magnet yang dihasilkan oleh komponen urutan negatif.

Torsi yang dihasilkan oleh komponen urutan positif dan negative ditunjukkan oleh persamaan (26) dan (27):

$$T_p = \frac{P_p}{\omega_m} = \frac{3 I_{pr}^2 R_r}{s \omega_s} \dots\dots\dots (26)$$

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_m} = \frac{3 I_{nr}^2 R_r}{(2-s) \omega_s} \dots\dots\dots (27)$$

Dimana  $\omega_m$  adalah kecepatan sudut rotor, dan  $\omega_s$  adalah kecepatan sinkron. Maka torsi ( $T$ ) keluaran dari motor ditentukan oleh Persamaan (28):

$$T = T_p + T_n = \frac{3 R_r}{\omega_s} \times \left( \frac{I_{pr}^2}{s} - \frac{I_{nr}^2}{2-s} \right) \dots\dots\dots (28)$$

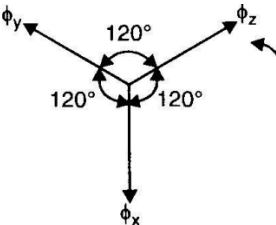
Maka efisiensi motor dapat dihitung menggunakan Persamaan (29):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (29)$$

## 2.10. Medan Putar Magnetic oleh Arus 3-Fase

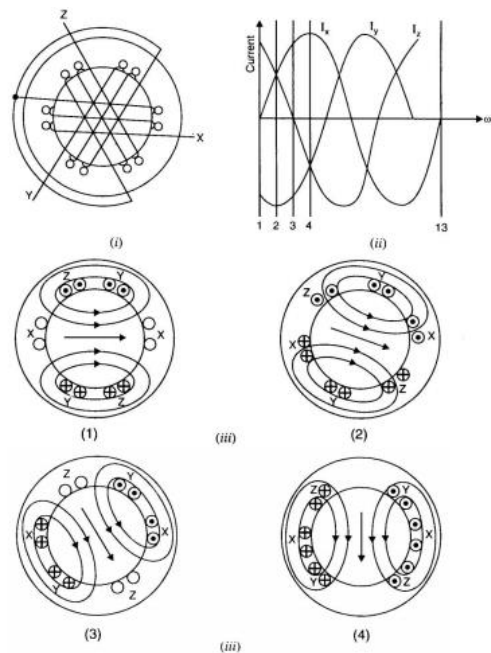
Pada belitan 3 fase jika disuplai dari sumber 3 fase, maka akan menimbulkan medan putar magnetic. Medan tersebut memiliki kutub-kutub tidak berada pada posisi yang tetap pada stator, tetapi selalu bergeser kedudukannya mengelilingi stator. Dalam kondisi itu, disebut juga medan putar. Hal tersebut dapat dilihat bahwa magnitude medan putar tetap dan sama dengan  $1.5 \Phi_m$  dimana  $\Phi_m$  adalah fluks maksimum untuk setiap fase.

Untuk mengetahui terjadinya medan putar dapat dengan mengasumsikan 2-kutub, 3-fase (ketiga belitan terpisah secara listrik sebesar  $120^\circ$  seperti pada gambar 10(i), ketiga fase X, Y, dan Z diberi daya dari sumber 3-fase dan arus pada masing-masing fase ditandai oleh  $I_x, I_y, I_z$  seperti gambar 10(ii). Fluks dihasilkan/dibangkitkan oleh arus yang diberikan oleh:

$$\begin{aligned} \phi_x &= \phi_m \sin \omega_t \\ \phi_y &= \phi_m \sin (\omega_t - 120^\circ) \\ \phi_z &= \phi_m \sin (\omega_t - 240^\circ) \end{aligned}$$


Gambar 9. Belitan terpisah secara listrik sebesar  $120^\circ$

Disini  $\Phi_m$  adalah fluks maksimum untuk setiap fase. Gambar 9 memperlihatkan diagram dari ketiga fluks. Sekarang akan ditunjukkan bahwa suplai 3-fase menghasilkan medan putar dengan magnitude konstan sama dengan  $1,5 \Phi_m$ .



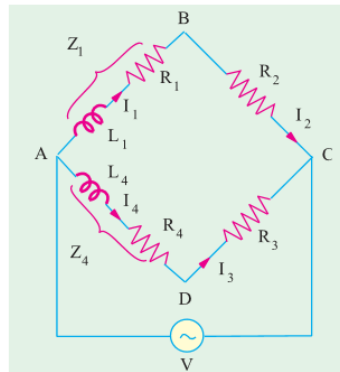
Gambar 10. Fluks yang dibangkitkan oleh arus

### 2.11. Maxwell Inductance Bridge

Peralatan listrik dalam pengoperasiannya bergantung pada prinsip listrik dasar, dan hampir semua pengumpulan data peralatan listrik tersebut bergantung pada alat pengukuran elektronik. Contohnya seperti pengukuran nilai resistansi, kapasitansi, induktansi, rpm, pengukuran arus, pengukuran tegangan, dan lain sebagainya. Dalam perkembangannya pemeriksaan peralatan listrik terus mengalami kemajuan, termasuk dalam pengukuran nilai-nilai yang ingin diketahui.

Pengukuran dan ketelitian dapat ditingkatkan dengan menggunakan metode rangkaian AC (*bridge circuit*), yang digunakan pada berbagai penerapan untuk mengukur tahanan, induktansi, dan kapasitansi, baik pada keadaan stedi maupun transien. Kemampuan untuk mengukur besaran-besaran listrik secara teliti itu merupakan suatu hal yang sangat penting (Holman, JP, 1984)

*Maxwell Bridge* merupakan alat yang digunakan sebagai pengukuran induktansi dalam skala menengah dan dapat diatur untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pada gambar 9, terdapat dua lengan yang mana setiap lengan mempunyai dua resistansi tetap untuk hubungan dua keseimbangan, keseimbangan fasa tergantung pada dua lengan yang tersisa. Jika kumparan dari impedansi diketahui sebagai  $Z_1$  yang terletak disatu lengan maka sudut fasa positif  $\theta_1$  diperbolehkan dalam salah satu, mengikuti dua cara berikut:



Gambar 11. *Maxwell Bridges*  
(Sumber: Theraja B.L., 2005)

1. Impedansi dikenal dengan sudut fasa positif yang sama dapat digunakan dalam salah satu lengan yang berdekatan (sehingga  $\theta_1 = \theta_3$  atau  $\theta_1 = \theta_4$ ), sisa dua lengan memiliki sudut fasa nol (menjadi resistansi tetap) seperti rangkaian yang disebut *AC Maxwell Bridge* atau *L<sub>3</sub>/L<sub>4</sub> Bridge*
2. Atau impedansi dengan sudut fasa negatif yang sama (kapasitansi) dapat digunakan di lengan berlawanan (sehingga  $\theta_1 + \theta_3 = 0$ ) Sehingga rangkaian ini dikenal dengan *Maxwell Wien* (gambar 11) atau *Maxwell L/C Bridge*

Oleh karena itu, disimpulkan bahwa impedansi induktif dapat diukur dari segi impedansi induktif lain (waktu konstan yang sama) baik yang berdekatan lengan (*Maxwell Bridge*) atau nilai impedansi induktif yang tidak diketahui dapat diukur dengan kombinasi dari resistansi dan kapasitansi di lengan yang berlawanan (*Maxwell-Wien Bridge*). Bagaimanapun penting bahwa dalam setiap kasus konstanta waktu dua impedansi harus disamakan.

Seperti pengertian menurut William D. Cooper, 1985 mengatakan bahwa jembatan Maxwell terbatas pada pengukuran kumparan dengan  $Q$  menengah ( $1 < Q < 10$ ). Ini dapat ditunjukkan dengan memperhatikan syarat setimbang kedua yang menyatakan bahwa jumlah sudut fasa satu lengan yang berhadapan harus sama dengan jumlah sudut-sudut fasa pasangan lainnya. Karena sudut fasa dari elemen elemen resistif dalam lengan 2 dan 3 berjumlah  $0^\circ$ , jumlah sudut-sudut lengan 1 dan lengan 4 juga harus berjumlah  $0^\circ$ .

Jembatan Maxwell juga tidak sesuai untuk pengukuran kumparan dengan nilai  $Q$  yang sangat rendah ( $Q < 1$ ) karena masalah kesetimbangan. Sebagai contoh nilai  $Q$  yang sangat rendah terdapat dalam tahanan induktif atau dalam kumparan frekuensi radio (RF) jika diukur pada frekuensi rendah.

Prosedur yang biasanya digunakan untuk menyetimbangkan jembatan Maxwell adalah dengan pertama-tama mengatur nilai  $R$  yang divariabelkan untuk kesetimbangan induktif dan kemudian mengatur  $R$  (yang satu lengan dengan induksi) untuk kesetimbangan resistif. Kembali ke pengaturan  $R$  variabel ternyata kesetimbangan resistif mengalami gangguan dan berpindah ke suatu nilai yang baru. Proses ini diulangi dan memberikan pemusatan yang lambat ke kesetimbangan akhir.

Untuk kumparan-kumparan Q menengah, efek tahanan tiak dinyatakan dan kesetimbangan tercapai melalui beberapa pengaturan.

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 9,

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = R_1 + j \omega L_1 \dots\dots\dots (\text{tidak diketahui}) \dots\dots\dots (30)$$

$$Z_4 = R_4 + jX_4 = R_4 + j \omega L_4 \dots\dots\dots (\text{diketahui}) \dots\dots\dots (31)$$

$R_2$  dan  $R_3$  adalah sebagai resistansi tetap.

Induktansi  $L_4$  merupakan variabel induktansi sendiri dari resistansi tetap, induktansi ini sama dengan  $L_1$ . Rangkaian Bridge akan seimbang dengan memvariasikan  $L_4$  dan salah satu resistansi  $R_2$  atau  $R_3$ . Alternatif lain  $R_2$  dan  $R_3$  dapat tetap dibiarkan konstan dan resistansi salah satu dari dua lengan lainnya dapat divariasikan dengan menghubungkan resistansi tambahan di lengannya. Kondisi seimbang jika

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \dots\dots\dots (32)$$

$$(R_1 + j \omega L_1) R_3 = (R_4 + j \omega L_4) R_2 \dots\dots\dots (33)$$

Menyamakan bagian yang nyata dan imajiner di kedua sisi, yang dimiliki

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ atau } R_1 / R_4 = R_2 / R_3 \dots\dots\dots (34)$$

(i.e. produk resistansi dari lengan yang berlawanan adalah sama), dan

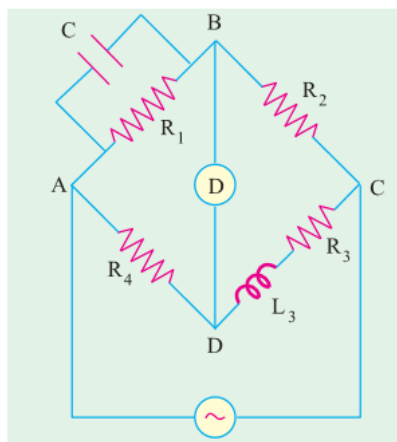
$$\omega L_1 R_3 = \omega L_4 R_2 \text{ atau } L_1 = L_4 \frac{R_2}{R_3} \dots\dots\dots (35)$$

$$\text{dapat juga ditulis dengan } L_1 = L_4 \frac{R_1}{R_4} \dots\dots\dots (36)$$

$$\text{atau } \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_4}{R_4} \dots\dots\dots (37)$$

(i.e waktu konstan dari dua coil yang sama)

Sedangkan *Maxwell-Wien Bridge* atau *Maxwell L/C Bridge* jika mengacu pada gambar 9, sudut fase positif dari impedansi induktif dapat dikompensasi dengan sudut fase negatif dari impedansi kapasitif dimasukkan ke dalam lengan yang berlawanan. Nilai induktansi yang tidak diketahui kemudian dapat diketahui dalam hal kapasitansi ini.



Gambar 12. *Maxwell Bridges*  
(Sumber: Theraja B.L., 2005)

Menemukan impedansi gabungan dari lengan 1.

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{-jX_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{j}{X_c} = \frac{1}{R_1} + j \omega C = \frac{1 + j \omega C R_1}{R_1} \dots\dots\dots (38)$$



$$\text{Jadi } Z_1 = \frac{R_1}{1 + j \omega C R_1}; Z_2 = R_2 \dots\dots\dots (39)$$

$$Z_3 = R_3 + j \omega L_3; Z_4 = R_4 \dots\dots\dots (40)$$

$$\text{Kondisi seimbang jika } Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \dots\dots\dots (41)$$

$$\text{Atau } \frac{R_1 (R_3 + j \omega L_3)}{1 + j \omega C R_1} = R_2 R_4 \dots\dots\dots (42)$$

$$\text{Atau } R_1 R_3 = j \omega L_3 R_1 = R_2 R_4 = j \omega C R_1 R_2 R_4 \dots\dots\dots (43)$$

Memisahkan bilangan nyata dan imajiner, maka akan menjadi

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ dan } \omega L_3 R_1 = \omega C R_1 R_2 R_4 \dots\dots\dots (44)$$

$$R_3 = \frac{R_2 R_4}{R_1} \text{ dan } L_3 = C R_2 R_4 \dots\dots\dots (45)$$

## 2.12. Perangkat Lunak Matlab

Matlab-Simulink merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh MathWork Inc. Perangkat lunak ini menggunakan bahasa pemrograman level tingkat tinggi dan dikhususkan untuk komputasi data. Bahasa pemrograman akan terintegrasi dengan kemampuan komputasi, visualisasi dan pemrograman yang mudah digunakan.

Matlab-Simulink ini digunakan sebagai alat simulasi untuk melihat pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor *bow thruster* pada keenam kondisi ketidakseimbangan tegangan di kapal dan berdasarkan faktor ketidakseimbangan aturan IEC. Performansi yang ingin didapatkan dari simulasi Matlab-Simulink adalah putaran motor, torsi, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB III METODOLOGI

### 3.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Identifikasi dan perumusan masalah adalah langkah awal yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor listrik *bow thruster* di kapal pada enam kondisi ketidakseimbangan beban dengan variasi nilai faktor ketidakseimbangan tegangan berdasarkan aturan *true definition* IEC

### 3.2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari teori-teori yang dapat menunjang permasalahan yang ada. Studi literatur didapatkan dari beberapa sumber berupa buku, jurnal, tugas akhir, artikel, dan internet. Secara umum, studi literatur pada penelitian ini mengacu pada pembahasan tentang ketidakseimbangan tegangan terhadap performansi motor listrik *bow thruster* di kapal pada enam kondisi ketidakseimbangan dan berdasarkan aturan *true definition* IEC.

### 3.3. Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, langkah pengumpulan data difokuskan pada variabel-variabel yang digunakan untuk melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak dalam menganalisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap performansi motor *bow thruster*. Data yang diperlukan adalah *name plate* motor *bow thruster*, katalog motor *bow thruster*, dan parameter motor *bow thruster*.

#### 3.3.1 Parameter motor *Bow Thruster*

Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan beberapa pendekatan untuk menentukan parameter motor *bow thruster*. Berikut ini tabel yang dibutuhkan dan percobaan yang harus dilakukan

Tabel 2. Parameter Motor *bow thruster* yang dibutuhkan

Parameter Motor <i>Bow Thruster</i>
Tahanan Stator ( $R_s$ )
Tahanan Rotor ( $R_r$ )
Reaktansi Stator ( $X_s$ )
Reaktansi Rotor ( $X_r$ )
Reaktansi Magnetisasi ( $X_m$ )

#### 3.3.2 Percobaan *Maxwell Inductance Bridge*

Untuk mendapatkan parameter motor *bow thruster* diperlukan percobaan *Maxwell Wien Bridge*. Langkah-langkah dalam pelaksanaan pengambilan data dan peralatan percobaan berikut ini:

##### 3.4.1 Peralatan yang digunakan

###### a. *Circuit Bridge*

Merupakan panel rangkaian resistor, inductor dan kapasitor sebagai alat yang digunakan dalam melakukan pengujian. Besaran nilai induktansi dan resistansi

b. *Function Generator*

Pada pengujian rangkaian ini digunakan sebuah function generator feedback FG-601 sebagai suplai arus ac untuk rangkaian.

c. *Multimeter*

Proses pengujian pada rangkaian ini membutuhkan multimeter sebagai alat ukur yang bias digunakan untuk mengetahui besaran arus dan voltase yang melalui rangkaian. Selain itu juga digunakan untuk mengukur besarnya tahanan resistansi.

d. *LCR meter*

Proses pengujian pada rangkaian ini membutuhkan multimeter sebagai alat ukur yang bias digunakan untuk mengetahui besaran nilai kapasitansi dan induktansi.

e. *Induktor Variabel*

Proses pengujian pada rangkaian ini membutuhkan variable inductor yang digunakan sebagai alat yang dapat memvariasikan nilai induktansi pada rangkaian percobaan yang mana menggunakan alat feedback 67-300

f. *Resistor Variabel*

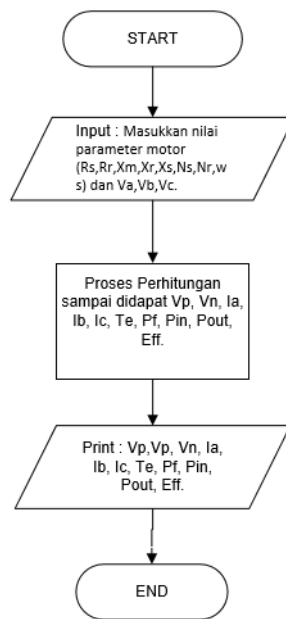
Proses pengujian pada rangkaian ini membutuhkan variable resistor yang digunakan sebagai alat yang dapat memvariasikan besarnya nilai resistansi pada rangkaian percobaan. Menggunakan alat feedback 67-140

### **3.4. Perhitungan Parameter Bow Thruster**

Perhitungan dilakukan untuk mendapatkan parameter yang diperlukan sebelum melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak seperti: tahanan rotor, tahanan stator, reaktansi rotor, reaktansi motor, reaktansi magnetisasi, impedansi, kecepatan stator sebagai variabel yang akan di inputkan ke Matlab-Simulink

### **3.5. Simulasi Menggunakan Matlab Simulink**

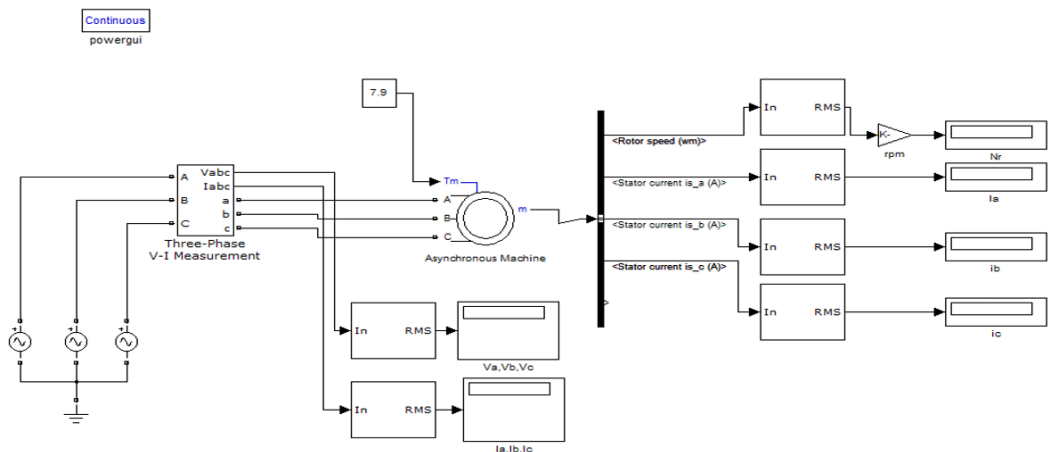
Melakukan simulasi pada perangkat lunak untuk mengetahui nilai tegangan rangkaian ekivalen motor induksi positif, tegangan rangkaian ekivalen motor induksi negative, arus setiap fasa, power faktor, daya masuk dan daya keluar. Selain itu simulasi menggunakan Matlab Simulink untuk mendapatkan hubungan segala variabel yang telah diketahui terhadap hasil simulasi, dan untuk mengetahui performansi motor. Sekaligus sebagai hasil perbandingan untuk hasil data-data secara general dari literature sebelumnya. Langkah-langkah melakukan simulasi berdasarkan flowchart dibawah ini:



Gambar 13. Flowchart Simulasi Matlab

### 3.5.1 Rangkaian Simulasi

Rangkaian Simulasi ditunjukkan oleh Gambar 20. Rangkaian simulasi ini digunakan untuk berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan.



Gambar 14. Rangkaian simulasi

Penyusunan rangkaian simulasi ketidakseimbangan tegangan dengan menggunakan Matlab Simulink, dimana dalam penyusunannya terdiri dari beberapa equipmen yaitu:

1. Input: AC Voltage Source, Three Phase V-I Measurement
2. Variable Control: Input Root Mean Square
3. Output: Va, Vb, Vc, Putaran rotor, Arus Stator A, Arus Stator B, Arus Stator C

### **3.6. Validasi Hasil Simulasi**

Validasi hasil simulasi dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan ketentuan IEC serta perhitungan manual. Untuk mengetahui apakah telah sesuai antara hasil simulasi dengan hasil perhitungan manual. Hal ini dapat menunjukkan seberapa besar antara error hasil simulasi dengan hasil perhitungan. Diharapkan dengan mengetahui nilai errornya sehingga dapat meminimalisir nilai error yang lebih dari 10%

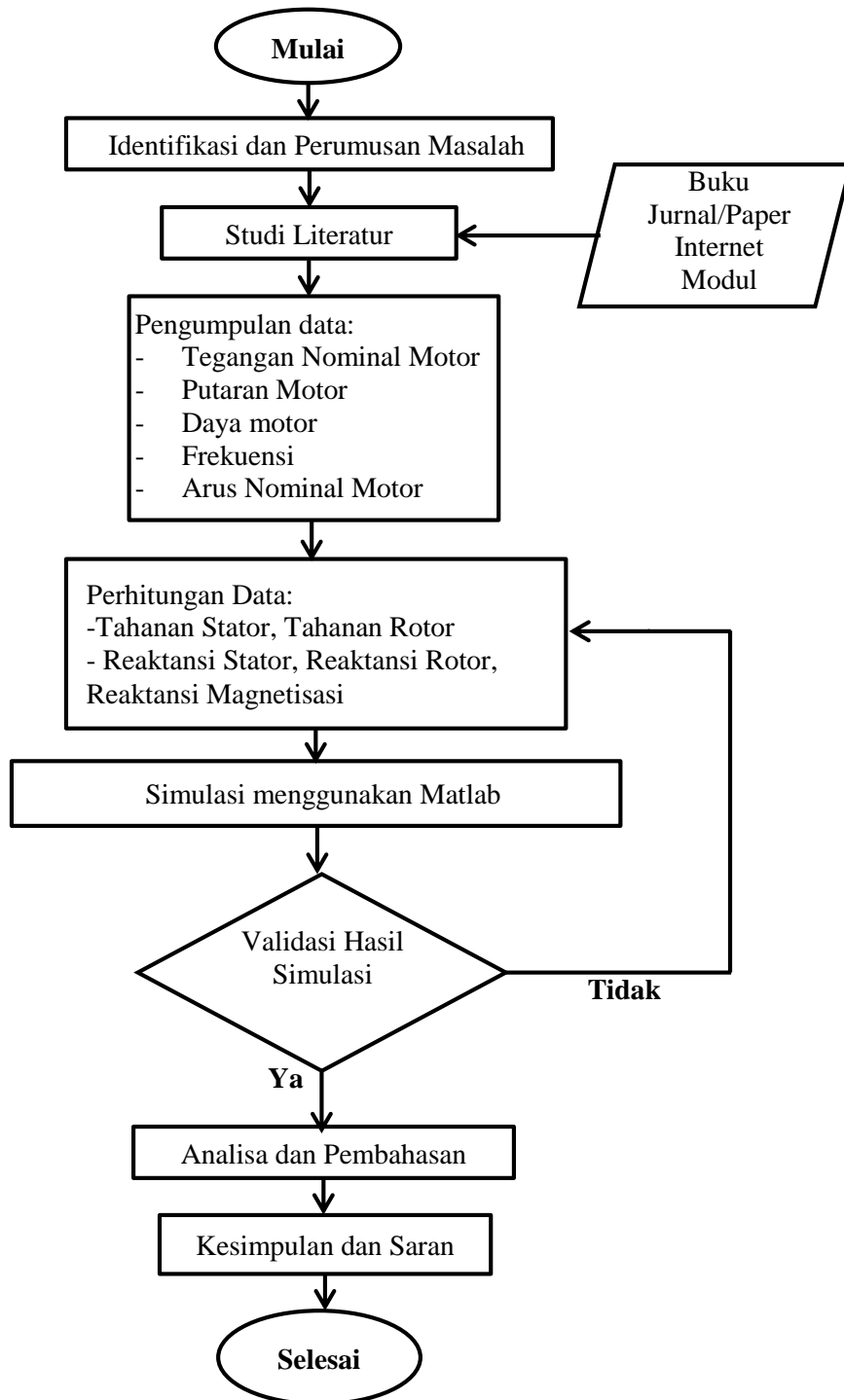
### **3.7. Analisa dan Pembahasan**

Pada pembahasan ini akan menganalisa ketidakseimbangan tegangan hasil dari data sebelumnya, perhitungan data, dan hasil dari simulasi. Analisa yang dilakukan adalah analisa ketidakseimbangan dengan enam kondisi ketidakseimbangan tegangan di kapal berdasarkan faktor ketidakseimbangan IEC. Hasil dari analisa itu akan dimasukkan kedalam grafik agar memudahkan pembacaanya dalam pembahasan

### **3.8. Kesimpulan dan Saran**

Setelah semua tahapan dilakukan, maka selanjutnya adalah menarik kesimpulan analisa data dan perbandingan grafik. Diharapkan nantinya hasil kesimpulan dapat menjawab permasalahan yang menjadi tujuan skripsi ini. Saran diberikan oleh penulis untuk menjadi rujukan tentang kendala-kendala yang terdapat dalam proses penulisan tugas akhir ini.

### 3.8 Flow Chart



[illegible]



## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Spesifikasi motor *bow thruster*

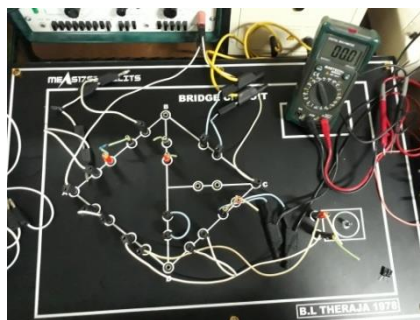
Type Motor	: Squirrel Cage, SAC 610-1200/1400
Motor Output	: 80 kW
Voltage, 3 Phase supply	: 400 V
Maximal Current	: 161 A
Frekuensi	: 50 Hz
RPM	: 1484 RPM

### 4.2 Parameter Motor Bow Thruster

Parameter motor *bow thruster* sangat diperlukan sebelum melakukan simulasi pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap kinerja motor bow thruster dikapal. Parameter ini didapatkan dengan cara melakukan pengambilan data melalui metode *Maxwell Inductance Bridge* yang diambil di laboratorium MEAS. Data tersebut nantinya akan menjadi parameter pembanding untuk mencari parameter bow thruster.

#### 4.2.1 Rangkaian *Maxwell Inductance Bridge*

Pengambilan data yang dilakukan pada motor induksi 3 fasa-Sangkar tupai dilaboratorium. Pengambilan data tersebut menggunakan rangkaian *Maxwell Inductance Bridge* yang mana rangkaiannya dapat dilihat seperti pada gambar 21 dibawah ini dengan komponen komponen yang dirangkai dan alat pendukung yang digunakan dalam proses pengukuran.



Gambar 15. Rangkaian *Maxwell Inductance Wien Bridges*  
(Sumber: Foto dari Laboratorium MEAS)

Dari pengambilan data diatas menunjukan bahwa rangkaian *bridges* merupakan kesetimbangan dari 4 hambatan atau lebih dengan resistor disetiap lengannya. Sehingga pada rangkaian *bridge* yang digunakan memiliki persamaan sebagai berikut:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ atau } R_1 / R_4 = R_2 / R_3.$$

Berikut ini data yang didapatkan dari pengambilan data rangkaian *bridges*, sebagai berikut:

- $R_1$  merupakan nilai dari hambatan yang harus bernilai tetap yang didapatkan dari alat variabel resistor, umumnya diatur 1000  $\Omega$  dan tersambung oleh kapasitor secara paralel
- $R_s$  atau  $R_3$  merupakan nilai hambatan dari *Maxwell inductance wien bridge* yang didapat dari motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan nilai yang terukur yaitu 299  $\Omega$
- $R_4$  merupakan nilai yang dicari dalam rangkaian *Maxwell inductance wien bridge* untuk menemukan nilai induktansi dari motor induksi 3 fasa sangkar tupai
- $R_2$  merupakan nilai dari hambatan yang harus bernilai tetap yang didapatkan dari alat variabel resistor, umumnya diatur 1000  $\Omega$
- $C_1$  merupakan nilai dari kapasitor yang bernilai 1 F dan terkoneksi dengan  $R_1$  secara paralel
- $L_s$  merupakan nilai induktansi yang dicari dari motor induksi 3 fasa sangkar tupai

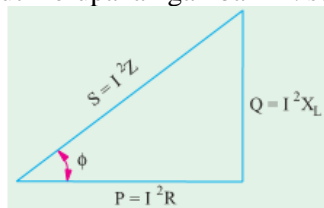
Maka untuk mencari nilai  $R_3$  adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1} \\
 &= \frac{1000 \cdot 299}{1000} \\
 &= 299 \Omega
 \end{aligned}$$

Dalam rangkaian *Maxweel Wien Bridge*, Nilai  $L$  juga didapat dengan menggunakan perhitungan. Dengan menggunakan rumusan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 L_3 &= CR_2R_4 \\
 L_3 &= 0,000001 \mu F \cdot 1000 \cdot 299 \\
 L_3 &= 0,299 \text{ H}
 \end{aligned}$$

$L_3$  merupakan nilai  $X_L$  dari motor induksi 3 fase rotor sangkar tupai laboratorium yang mana  $X_L$  ini merupakan salah satu variabel untuk mencari daya reaktif ( $Q$ ) dari suatu motor. Sedangkan daya reaktif suatu motor ( $Q$ ) dapat diketahui nilainya dengan menggunakan rumus segitiga daya, yang mana terdiri dari daya reaktif ( $Q$ ), daya aktif ( $P$ ), dan daya semu ( $S$ ). Berikut merupakan gambar 22. segitiga daya:



Gambar 16. Segitiga Daya  
(Sumber: Theraja B.L., 2005)

Sebelum menghitung nilai daya reaktif ( $Q_m$ ), harus menghitung terlebih dahulu nilai daya semu dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 S &= (\sqrt{3}) V I \\
 &= 400 (161) (\sqrt{3}) \\
 &= 111.544,072 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

$$P = 80.000 \text{ watt}$$

Maka nilai Q adalah

$$\begin{aligned}
 Q &= \sqrt{S^2 - P^2} \\
 &= \sqrt{111.544,072^2 - 80.000^2} \\
 &= 77.730,812 \text{ VAR}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya menghitung nilai arus yang berasal dari nilai induktansi motor pada rangkaian *maxwell inductance wien bridge* sesuai dengan persamaan

$$77.730,812 = I_1^2 (0.299)$$

$$I_1 = 509.8718 \text{ A}$$

Setelah nilai arus diketahui maka langkah selanjutnya mencari nilai R pada persamaan berikut:

$$P = I_1^2 R$$

$$80.000 = (509.8718^2) R$$

$$R = 0,03077 \Omega$$

Menghitung parameter-parameter motor bow thruster pada persamaan berikut:

$$S = I_1^2 Z$$

$$111.544,072 = (509.8718^2) Z$$

$$Z = 0.04291 \Omega$$

$$\begin{aligned}
 X_{hs} &= (\sqrt{Z^2 - R^2}) \\
 &= (\sqrt{0.0429^2 - 0.03077^2}) \\
 &= 0.02989 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_s &= 0.6 X_{hs} \\
 &= 0.6 (0.02989) \\
 &= 0.01796 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_r &= 0.4 X_{hs} \\
 &= 0.4 (0.02989) \\
 &= 0.01195 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_r &= 0.4 R \\
 &= 0.4 (0.03077) \\
 &= 0.012308
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_s &= R - R_r \\
 &= 0.03077 - 0.012308 \\
 &= 0.01846 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_m &= (\sqrt{X_{hs}^2 + X_r^2 + X_s^2}) \\
 &= \sqrt{(0.02989^2 + 0.01796^2 + 0.01195^2)} \\
 &= 0.2445 \Omega
 \end{aligned}$$

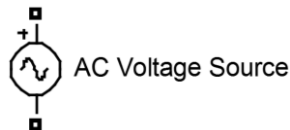
Maka parameter – parameter nilai motor bow thruster yang dapat dihitung adalah sebagai berikut:

$X_s$	$X_r$	$R_r$	$R_s$	$X_m$
$0.0179 \Omega$	$0.0119 \Omega$	$0.0123 \Omega$	$0.01846 \Omega$	$0.2445 \Omega$

### 4.3 Simulasi

Simulasi diperlukan untuk menentukan nilai dari beberapa variabel. Jadi hasil dari simulasi ini berupa nilai, bukan berupa grafik. Adapun diagram blok yang diperlukan adalah:

#### 3.3.1 AC Voltage Source



Gambar 17. AC Voltage Source  
(Sumber: Matlab R2014a)

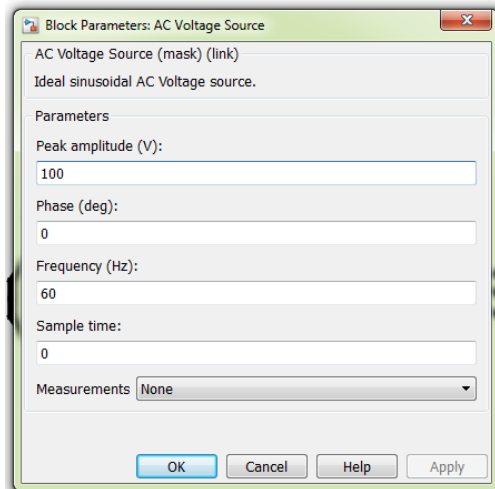
AC Voltage Source block merepresentasikan sebuah sumber tegangan ideal yang mana mempunyai tegangan sinusoida yang melalui output terminal, dan Hanya ada satu arus yang melalui sumber tegangan. Persamaan output tegangan dari blok diagram adalah :

$$V = V_o \times \sin(2\pi \times f \times t + \varphi)$$

Dimana:

$V$	Tegangan
$V_o$	Amplitudo tertinggi
$f$	Frekuensi
$\varphi$	pergeseran sudut
$t$	waktu

Mengganti Blok parameter AC Voltage Source, sesuai dengan tampilan blok parameter pada gambar 21.



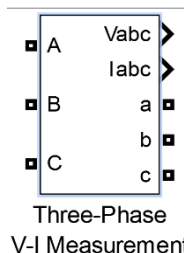
Gambar 18. Blok parameter AC Voltage Source  
(Sumber: Matlab R2014a)

Berdasarkan spesifikasi motor bow thruster maka blok parameter harus diganti menyesuaikan spesifikasi motornya.

- Peak amplitude dengan satuan volt diganti dengan nilai 250
- Pergeseran sudut diganti dengan 0
- Frekuensi mengikuti frekuensi motor yaitu 50 Hz
- Sample time diganti dengan 0

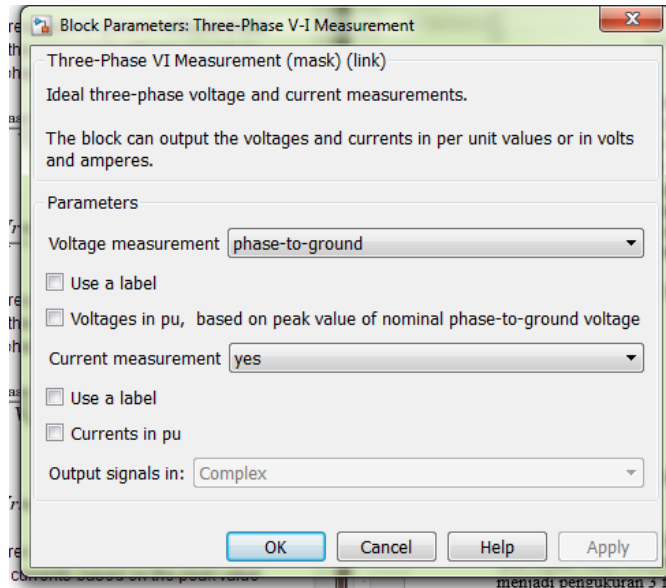
Selanjutnya dibutuhkan blok diagram AC Voltage Source sebanyak 3 unit, yang di rangkai seri menjadi satu sumber.

### 3.3.2 Three-Phase V-I Measurement



Gambar 19. *Three Phase V-I Measurement*  
(Sumber: Matlab R2014a)

Blok *Three Phase V-I Measurement* digunakan untuk mengukur tegangan tiga fasa dan arus dalam suatu sirkuit. Ketika dikoneksikan series dengan tiga fasa element, akan menjadi pengukuran 3 fasa-ground atau fasa ke fasa tegangan dan arus.



Gambar 20. Blok parameter *Three Phase V-I Measurement*  
(Sumber: Matlab R2014a)

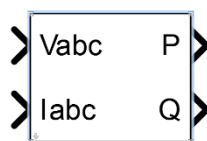
Parameter yang digunakan adalah voltage measurement dengan memilih *phase to ground*. Dengan memilih untuk mengukur *phase to ground voltages* dalam per unit. Konvert blok untu pengukuran tegangan berdasarkan nilai tertinggi dari nominal tegangan fasa ke ground sebagai berikut:

$$V_{abc} = V_{\text{fasa ke ground}} / V_{\text{base}}$$

Dimana

$$V_{\text{base}} = V_{\text{nom}} (V_{\text{rms}}) \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

### 3.3.3 Power (3ph, Instantaneous)



Power  
(3ph, Instantaneous)

Gambar 21. Blok *Power (3ph, Instantaneous)*  
(Sumber: Matlab R2014a)

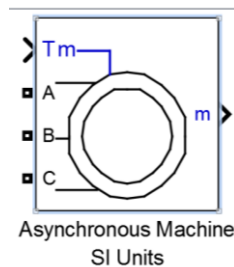
Blok diagram *Power (3ph, Instantaneous)* memperhitungkan daya aktif dalam watt dan daya reaktif dalam vars menghubungkan periodic set dari tegangan 3 fasa dan arusnya. Formula yang digunakan untuk perhitungan

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c$$

$$Q = (1/\sqrt{3}) [(V_b - V_c) \cdot I_a + (V_c - V_a) I_b + (V_a - V_b) I_c]$$

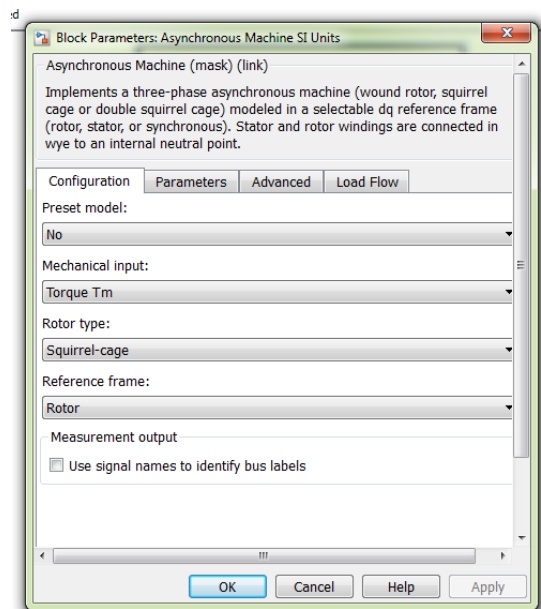
Dengan persamaan diatas, laju arus masuk kedalam RL sirkuit memproduksi Positive P dan Positive Q

### 3.3.4 Asynchronous Machine SI Units



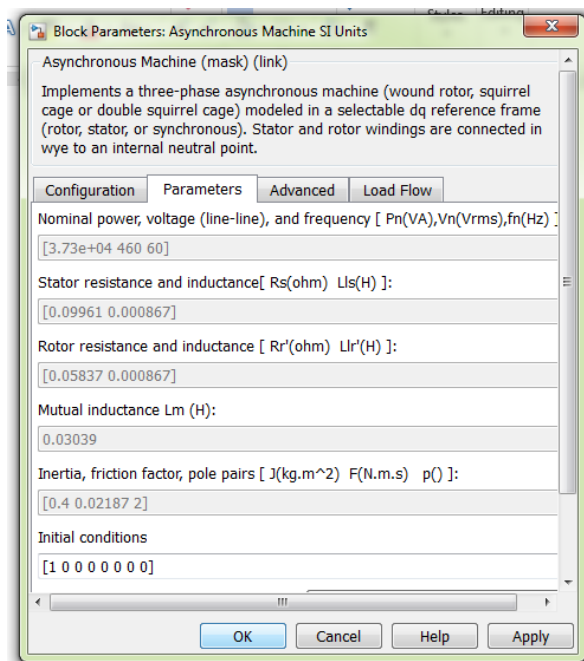
Gambar 22. Blok *Asynchronous Machine SI Units*  
(Sumber: Matlab R2014a)

Memilih motor *Asynchronous Machine SI Units* dan mengganti blok parameter.



Gambar 23. Blok Parameter Konfigurasi *Asynchronous Machine SI Units*  
(Sumber: Matlab R2014a)

Mengganti present model dengan memilih “No” dan memasukkan nilai Mechanical Input dengan menginput “Torque Tm” dengan tipe rotor squirrel-cage. Reference Frame diganti rotor. Setelah itu pindah di tab selanjutnya yaitu parameters



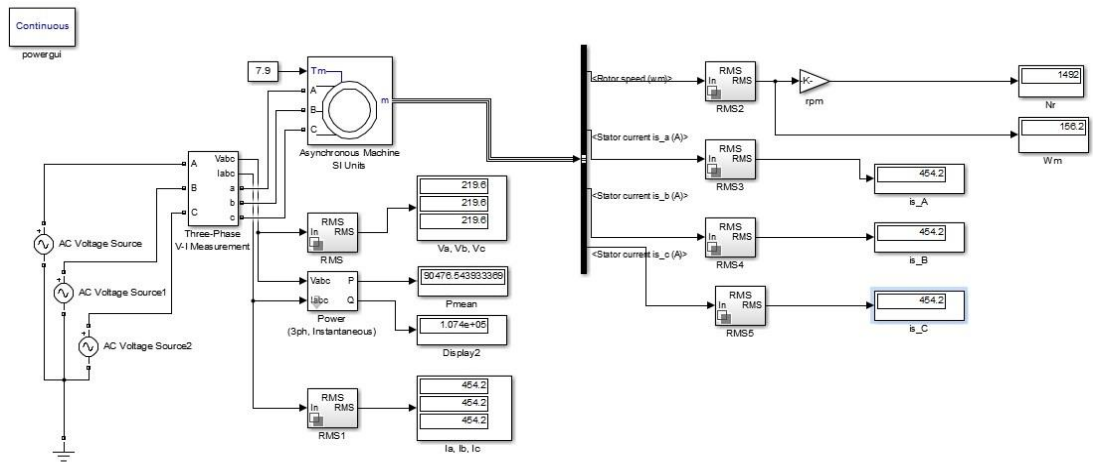
Gambar 24. Blok Parameter Konfigurasi *Asynchronous Machine SI Units*  
(Sumber: Matlab R2014a)

Mengganti parameter-parameter yang dibutuhkan yaitu:

Nominal Power	: 80 kW
Voltage line	: 400 V
Frekuensi	: 50 Hz
$R_s$	: $0.4433 \Omega$
$X_L$	: $0.299 \text{ H}$
$R_r$	: $0.44 \Omega$



### 3.3.5 Hasil Diagram Simulasi Kondisi Seimbang



Gambar 25. Simulasi Kondisi Seimbang  
(Sumber: Matlab R2014a)

Pada gambar 31 merupakan gambar hasil simulasi motor *bow thruster* pada kondisi seimbang. Simulasi ini diperlukan untuk mengetahui karakteristik motor *bow thruster* pada kondisi normal dengan tegangan fasa yang seimbang. Berikut ini merupakan tabel karakteristik motor *bow thruster*

Tabel 3. Hasil Simulasi pada Kondisi Tegangan Seimbang

VUF	Vp (volt)	Vn (volt)	I (ampere)	Pin	Pout (kW)	effisiensi (%)	RPM
0%	219,6	0	454,2	90,48	80	88,4%	1492

### 3.3.6 Simulasi Kondisi Tidak Seimbang

Simulasi kondisi tidak seimbang pada matlab untuk motor *bow thruster* ini dilakukan dengan memberikan nilai tegangan yang tidak seimbang pada rangkaian motor *bow thruster* yang telah dihitung. Setelah mengganti nilai variabel pada input matlab simulink. Lakukan simulasi pada matlab simulink sehingga mendapatkan nilai – nilai variasi keseimbangan. Selanjutnya di lakukan langkah perhitungan sebagai berikut:

- Langkah Pertama adalah menghitung tegangan urutan positif dan tegangan urutan negatif. Contoh perhitungan ini dilakukan pada kondisi *undervoltage* 3 (tiga) Fasa
  - Menghitung Nilai Tegangan Urutan Positif

$$V_p = \frac{Va + (a \times Vb) + (a^2 \times Vc)}{3}$$

$$V_p = \frac{199.5 + (1 \angle 120)(217.5 \angle -120) + (1 \angle -120)(196.5 \angle 120)}{3}$$

$$V_p = \frac{199.5 + (-0.5 + 0.866i)(217.5 (-0.5 - 0.866i)) + (-0.5 - 0.866i)(196.5 (-0.5 + 0.866i))}{3}$$

$$V_p = 204.491$$

b. Menghitung Nilai Tegangan Urutan Negatif

$$V_n = \frac{Va + (a^2 \times Vb) + (a \times Vc)}{3}$$

$$V_n = \frac{199.5 + (1 \angle -120)(217.5 \angle -120) + (1 \angle 120)(196.5 \angle 120)}{3}$$

$$V_n = \frac{199.5 + (-0.5 - 0.866i)(217.5(-0.5 - 0.866i)) + (-0.5 + 0.866i)(196.5(-0.5 + 0.866i))}{3}$$

$$V_n = 6.551$$

Selanjutnya menghitung nilai faktor ketidakseimbangan tegangannya sebagai berikut:

$$VUF = \frac{V_n}{V_p} \times 100\%$$

$$VUF = \frac{6.551}{204.491} \times 100\%$$

$$VUF = 3\%$$

Berikut ini beberapa tabel hasil simulasi matlab simulink dengan berbagai kondisi tidak seimbangan tegangan menggunakan beberapa variasi:

a. **Beberapa Tabel Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)**

Tabel 4. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 1%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Va (volt)	Vb (volt)	Vc (volt)	Vp	Vn
3-UV	1%	209.5	214.7	214.7	212.792	1.895163
2-UV	1%	220.1	214	214	215.9898	2.007019
1-UV	1%	211.7	220	220	217.226	2.7618
1-OV	1%	220.2	226	221	222.308	1.9749
2-OV	1%	220.6	224.9	224.9	223.4565	1.426
3-OV	1%	224.3	231.7	228.9	228.2917	2.151167

Pada tabel 3 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan voltase untuk setiap kondisi pada faktor ketidakseimbangan tegangan atau VUF 1%. Untuk kondisi 1 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa R atau pada tegangan Va. Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa Vb dan Vc. Sementara untuk kondisi 3 fasa *undervoltage* terjadi pada semua fasa yaitu, Va, Vb, dan Vc. Berbeda dengan kondisi 1 fasa *overvoltage* yang terjadi pada fasa Vb. Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *overvoltage* terjadi pada Vb dan Vc. Hal tersebut sama dengan kondisi 2 fasa *undervoltage*. Terakhir untuk kondisi 3 fasa *overvoltage* terjadi pada semua fasa, yaitu Va, Vb, dan Vc. Sementara untuk nilai Vp dan Vn didapatkan dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (10) dengan mengubah tegangan Va, Vb, dan Vc kedalam bentuk polar. Berikut merupakan tabel 4 yang menunjukkan bentuk polar Va, Vb, dan Vc.

Tabel 5. Bentuk Polar dari  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  untuk seluruh kondisi pada VUF 1%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$v_a$ (polar)	$v_b$ (polar)	$v_c$ (polar)
3-UV	1%	209.5	-107.35-185.93i	-107.35+185.93i
2-UV	1%	220.1	-107-185.32i	-107+185.32i
1-UV	1%	213.9	-110-190.52i	-106+183.592i
1-OV	1%	220.2	-113-195.716i	-110+191.386i
2-OV	1%	220.6	-112.45-194.76i	-112.45+194.76i
3-OV	1%	224.3	-115.85-200.65i	-114.45+198.23i

Sedangkan nilai VUF merupakan pembagian antara nilai  $V_n$  terhadap nilai  $V_p$  dengan satuan persentase. Sehingga didapatkan nilai VUF 1%. Untuk nilai  $V_a$  dalam bentuk polar, tidak memiliki bilangan imajiner. Sementara untuk nilai  $V_b$  dan  $V_c$  mempunyai bilangan imajiner.

Tabel 6. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 2%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$V_a$ (volt)	$V_b$ (volt)	$V_c$ (volt)	$V_p$	$V_n$
3-UV	2%	217.7	206.4	206.4	210.2413	3.255706
2-UV	2%	220	210	210	213.659	3.671288
1-UV	2%	208.8	220	220	216.2817	3.751588
1-OV	2%	220.3	230.8	220.9	223.958	3.417
2-OV	2%	219.6	231.5	232.9	227.866	4.3649
3-OV	2%	224.5	237.2	233	231.558	3.729633

Pada tabel 5 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan voltase untuk setiap kondisi pada faktor ketidakseimbangan tegangan atau VUF 2%. Untuk kondisi 1 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa R atau pada tegangan  $V_a$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa  $V_b$  dan  $V_c$ . Sementara untuk kondisi 3 fasa *undervoltage* terjadi pada semua fasa yaitu,  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Berbeda dengan kondisi 1 fasa *overvoltage* yang terjadi pada fasa  $V_b$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *overvoltage* terjadi pada  $V_b$  dan  $V_c$ . Hal tersebut sama dengan kondisi 2 fasa *undervoltage*. Terakhir, untuk kondisi 3 fasa *overvoltage* terjadi pada semua fasa, yaitu  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Sementara untuk nilai  $V_p$  dan  $V_n$  didapatkan dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (10) dengan mengubah tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  kedalam bentuk polar. Berikut merupakan tabel 6 yang menunjukkan bentuk polar  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ .

Tabel 7. Bentuk Polar dari  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  untuk seluruh kondisi pada VUF 2%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$v_a$ (polar)	$v_b$ (polar)	$v_c$ (polar)
3-UV	2%	217.7	-103.2-178.74i	-103.2+178.74i
2-UV	2%	220	-105-181.86i	-105i+181.86i
1-UV	2%	208.8	-110-190.52i	-104+180.821i
1-OV	2%	220.3	-115.4-199.8728i	-110.45+191.299i
2-OV	2%	219.6	-115-200.48i	-116.45+201.6914i
3-OV	2%	224.5	-118.6-205.415i	-116.5+201.778i

Sedangkan nilai VUF merupakan pembagian antara nilai  $V_n$  terhadap nilai  $V_p$  dengan satuan persentase. Sehingga didapatkan nilai VUF 2%. Untuk nilai  $V_a$  dalam bentuk polar, tidak memiliki bilangan imajiner. Sementara untuk nilai  $V_b$  dan  $V_c$  mempunyai bilangan imajiner.

Tabel 8. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 3%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$V_a$ (volt)	$V_b$ (volt)	$V_c$ (volt)	$V_p$	$V_n$
3-UV	3%	199.5	217.5	196.5	204.491	6.551
2-UV	3%	220	202.4	202.4	208.2544	5.87597
1-UV	3%	203.3	220	220	214.4253	5.561827
1-OV	3%	219.9	239.8	221.3	226.993	6.408
2-OV	3%	220	238.2	239.6	232.5914	6.308013
3-OV	3%	224.4	245.8	243	237.7236	6.708924

Pada tabel 7 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan voltase untuk setiap kondisi pada faktor ketidakseimbangan tegangan atau VUF 3%. Untuk kondisi 1 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa R atau pada tegangan  $V_a$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa  $V_b$  dan  $V_c$ . Sementara untuk kondisi 3 fasa *undervoltage* terjadi pada semua fasa yaitu,  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Berbeda dengan kondisi 1 fasa *overvoltage* yang terjadi pada fasa  $V_b$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *overvoltage* terjadi pada  $V_b$  dan  $V_c$ . Hal tersebut sama dengan kondisi 2 fasa *undervoltage*. Terakhir, untuk kondisi 3 fasa *overvoltage* terjadi pada semua fasa, yaitu  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Sementara untuk nilai  $V_p$  dan  $V_n$  didapatkan dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (10) dengan mengubah tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  kedalam bentuk polar. Berikut merupakan tabel 8 yang menunjukkan bentuk polar  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ .

Tabel 9. Bentuk Polar dari  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  untuk seluruh kondisi pada VUF 3%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$v_a$ (polar)	$v_b$ (polar)	$v_c$ (polar)
3-UV	3%	199.5	-108.75-188.35i	-98.25+170.17i
2-UV	3%	220	-101.2-175.28i	-101.2+175.28i
1-UV	3%	203.3	-110-190.52i	-101.65+176.06i
1-OV	3%	219.9	-119.9-207.67i	-110.65+191.65i
2-OV	3%	220	-119.1-206.2812i	-119.8+207.494i
3-OV	3%	224.4	-122.9-212.86i	-121.5+210.438i

Sedangkan nilai VUF merupakan pembagian antara nilai  $V_n$  terhadap nilai  $V_p$  dengan satuan persentase. Sehingga didapatkan nilai VUF 3%. Untuk nilai  $V_a$  dalam bentuk polar, tidak memiliki bilangan imajiner. Sementara untuk nilai  $V_b$  dan  $V_c$  mempunyai bilangan imajiner.

Tabel 10. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 4%

Tipe Kondisi	VUF (%)	$V_a$ (volt)	$V_b$ (volt)	$V_c$ (volt)	$V_p$	$V_n$
3-UV	4%	192.5	216.7	195	201.392	7.678
2-UV	4%	220	195.6	195.6	203.7264	8.137406
1-UV	4%	195.9	220	220	211.9817	8.051587
1-OV	4%	221	245.7	220.2	228.99	8.3482
2-OV	4%	220.3	247	245.6	237.6241	8.670362
3-OV	4%	224	250.5	249.1	241.1898	8.6028

Pada tabel 9 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan voltase untuk setiap kondisi pada faktor ketidakseimbangan tegangan atau VUF 4%. Untuk kondisi 1 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa R atau pada tegangan  $V_a$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa  $V_b$  dan  $V_c$ . Sementara untuk kondisi 3 fasa *undervoltage* terjadi pada semua fasa yaitu,  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Berbeda dengan kondisi 1 fasa *overvoltage* yang terjadi pada fasa  $V_b$ . Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *overvoltage* terjadi pada  $V_b$  dan  $V_c$ . Hal tersebut sama dengan kondisi 2 fasa *undervoltage*. Terakhir, untuk kondisi 3 fasa *overvoltage* terjadi pada semua fasa, yaitu  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Sementara untuk nilai  $V_p$  dan  $V_n$  didapatkan dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (10) dengan mengubah tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  kedalam bentuk polar. Berikut merupakan tabel 10 yang menunjukkan bentuk polar  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ .

Tabel 11. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 4%

Tipe Kondisi	VUF (%)	va (polar)	vb (polar)	vc (polar)
3-UV	4%	192.5	-108.35-187.66i	-97.5+168.87i
2-UV	4%	220	-97.8-169.39i	-97.8+169.39i
1-UV	4%	195.9	-110-190.52i	-98+169.74i
1-OV	4%	221	-122.85-212.78i	-110.15+190.78i
2-OV	4%	220.3	-123.5-213.902i	-122.8+212.689i
3-OV	4%	224	-125.25-216.93i	-124.55+215.72i

Sedangkan nilai VUF merupakan pembagian antara nilai Vn terhadap nilai Vp dengan satuan persentase. Sehingga didapatkan nilai VUF 4%. Untuk nilai Va dalam bentuk polar, tidak memiliki bilangan imajiner. Sementara untuk nilai Vb dan Vc mempunyai bilangan imajiner.

Tabel 12. Hasil Simulasi Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Voltase dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 5%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Va (volt)	Vb (volt)	Vc (volt)	Vp	Vn
3-UV	5%	188.7	188.2	217.9	198.2584	9.816973
2-UV	5%	188.9	188	219.8	198.89	10.45
1-UV	5%	188.7	220	220	209.6272	10.46379
1-OV	5%	252.7	220.3	220.3	231.092	10.80473
2-OV	5%	253.2	253.8	219.9	242.2902	11.20172
3-OV	5%	224	250.5	249.1	247.8247	11.34662

Pada tabel 12 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan voltase untuk setiap kondisi pada faktor ketidakseimbangan tegangan atau VUF 5%. Untuk kondisi 1 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa R atau pada tegangan Va. Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *undervoltage* terjadi pada fasa Va dan Vb. Sementara untuk kondisi 3 fasa *undervoltage* terjadi pada semua fasa yaitu, Va, Vb, dan Vc. Berbeda dengan kondisi 1 fasa *overvoltage* yang terjadi pada fasa Va. Sedangkan untuk kondisi 2 fasa *overvoltage* terjadi pada Va dan Vb. Hal tersebut sama dengan kondisi 2 fasa *undervoltage*. Terakhir, untuk kondisi 3 fasa *overvoltage* terjadi pada semua fasa, yaitu Va, Vb, dan Vc. Sementara untuk nilai Vp dan Vn didapatkan dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (10) dengan mengubah tegangan Va, Vb, dan Vc kedalam bentuk polar. Berikut merupakan tabel 12 yang menunjukkan bentuk polar Va, Vb, dan Vc.

Tabel 13. Bentuk Polar dari Va, Vb, dan Vc untuk seluruh kondisi pada VUF 5%

Tipe Kondisi	VUF (%)	va (polar)	vb (polar)	vc (polar)
3-UV	5%	188.7	-94.1-162.98i	-108.95+188.70i
2-UV	5%	188.9	-94-162.808i	-109.9+190.3468i
1-UV	5%	188.7	-110.05-190.61i	-110.05+190.61i
1-OV	5%	252.7	-110.15-190.77i	-110.15+190.77i
2-OV	5%	253.2	-126.9-219.79i	-109.95+190.43i
3-OV	5%	224	-125.25-216.93i	-124.55+215.72i

Sedangkan nilai VUF merupakan pembagian antara nilai Vn terhadap nilai Vp dengan satuan persentase. Sehingga didapatkan nilai VUF 5%. Untuk nilai Va dalam bentuk polar, tidak memiliki bilangan imajiner. Sementara untuk nilai Vb dan Vc mempunyai bilangan imajiner.

**b. Beberapa Tabel Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)**

Tabel 14. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 1%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Is_a (ampere)	Is_b (ampere)	Is_c (ampere)	Rata-rata Is
3-UV	1%	519.4	500.4	468.1	495.9667
2-UV	1%	517.2	491	461	489.7333
1-UV	1%	503.8	485.1	452.7	480.5333
1-OV	1%	501.2	482.4	449	477.5333
2-OV	1%	464.9	486.5	469.8	473.7333
3-OV	1%	460.2	495.9	435	463.7

Pada tabel 14 dapat dilihat nilai arus stator untuk setiap fasa R, S, dan T yang ditunjukkan oleh Is\_a, Is\_b, dan Is\_c. Di tabel 13 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami penurunan dari kondisi 3 fasa *undervoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*, hal ini menyebabkan rata-rata arus stator pada kondisi tersebut merupakan nilai terkecil sebesar 463.7 ampere diantara nilai rata-rata arus stator pada keenam kondisi. Hal ini sesuai dengan rumus.  $P = V I \cos \theta$ . Dimana V merupakan nilai tegangan pada motor *bow thruster*, nilai I merupakan nilai arus stator dan P merupakan daya output pada motor *bow thruster*. Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik

Tabel 15. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 2%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Is_a (ampere)	Is_b (ampere)	Is_c (ampere)	Rata-rata Is
3-UV	2%	525.9	502.9	472.4	500.4
2-UV	2%	521.8	501.4	468.7	497.3
1-UV	2%	505.6	486.4	452	481.3333
1-OV	2%	498.5	477.4	448.3	474.7333
2-OV	2%	461.9	490.5	459.2	470.5333
3-OV	2%	452.5	482.2	452.2	462.3

Pada tabel 15 dapat dilihat nilai arus stator untuk setiap fasa R, S, dan T yang ditunjukkan oleh Is\_a, Is\_b, dan Is\_c. Di tabel 14 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami kenaikan dari kondisi 3 fasa *overvoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*, hal ini menyebabkan rata-rata arus stator pada kondisi tersebut merupakan nilai terkecil sebesar 462.3 ampere diantara nilai rata-rata arus stator pada keenam kondisi. Hal ini sesuai dengan rumus  $P = V I \cos \theta$ . Dimana V merupakan nilai tegangan pada motor *bow thruster*, nilai I merupakan nilai arus stator dan P merupakan daya output pada motor *bow thruster*. Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik

Tabel 16. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 3%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Is_a (ampere)	Is_b (ampere)	Is_c (ampere)	Rata-rata Is
3-UV	3%	539.5	514.4	483.3	512.4
2-UV	3%	529.5	509.5	476.8	505.2667
1-UV	3%	508.3	485.8	454	482.7
1-OV	3%	507	431.7	457.7	465.4667
2-OV	3%	476.3	507.9	438.8	474.3333
3-OV	3%	447.6	426.6	405.5	426.5667

Pada tabel 16 dapat dilihat nilai arus stator untuk setiap fasa R, S, dan T yang ditunjukkan oleh Is\_a, Is\_b, dan Is\_c. Di tabel 15 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami kenaikan dari kondisi 3 fasa *overvoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*, hal ini menyebabkan rata-rata arus stator pada kondisi tersebut merupakan nilai terkecil sebesar 426.56 ampere diantara nilai rata-rata arus stator pada keenam kondisi. Hal ini sesuai dengan rumus  $P = V I \cos \theta$ . Dimana V merupakan nilai tegangan pada motor *bow*



*thruster*, nilai I merupakan nilai arus stator dan P merupakan daya output pada motor *bow thruster*. Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik

Tabel 17. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 4%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Is_a (ampere)	Is_b (ampere)	Is_c (ampere)	Rata-rata Is
3-UV	4%	543.8	525	489.9	519.5667
2-UV	4%	538.3	514.7	483.8	512.2667
1-UV	4%	509.4	490.3	465.6	488.4333
1-OV	4%	477.4	505.1	439.7	474.0667
2-OV	4%	473.9	441.9	471.1	462.3
3-OV	4%	438.7	415.1	398	417.2667

Pada tabel 17 dapat dilihat nilai arus stator untuk setiap fasa R, S, dan T yang ditunjukkan oleh Is\_a, Is\_b, dan Is\_c. Di tabel 16 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami kenaikan dari kondisi 3 fasa *overvoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*, hal ini menyebabkan rata-rata arus stator pada kondisi tersebut merupakan nilai terkecil sebesar 417.267 ampere diantara nilai rata-rata arus stator pada keenam kondisi. Hal ini sesuai dengan rumus  $P = V I \cos \theta$ . Dimana V merupakan nilai tegangan pada motor *bow thruster*, nilai I merupakan nilai arus stator dan P merupakan daya output pada motor *bow thruster*. Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik

Tabel 18. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Arus Stator dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan) 5%

Tipe Kondisi	VUF (%)	Is_a (ampere)	Is_b (ampere)	Is_c (ampere)	Rata-rata Is
3-UV	5%	547.8	525.9	488.8	520.8333
2-UV	5%	543.8	525	489.9	519.5667
1-UV	5%	534.6	507.5	475.8	505.9667
1-OV	5%	471	453.6	424.4	449.6667
2-OV	5%	426.4	371.7	411.3	403.1333
3-OV	5%	423	372.6	414.6	403.4

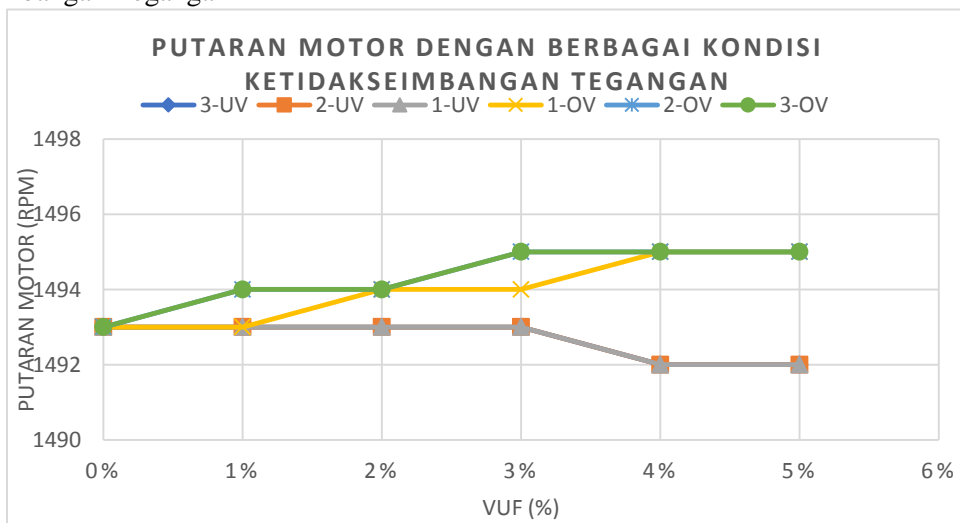
Pada tabel 18 dapat dilihat nilai arus stator untuk setiap fasa R, S, dan T yang ditunjukkan oleh  $I_{s\_a}$ ,  $I_{s\_b}$ , dan  $I_{s\_c}$ . Di tabel 16 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami kenaikan dari kondisi 3 fasa *overvoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*, hal ini menyebabkan rata-rata arus stator pada kondisi tersebut merupakan nilai terkecil sebesar 403.4 ampere diantara nilai rata-rata arus stator pada keenam kondisi. Hal ini sesuai dengan rumus  $P = V I \cos \theta$ . Dimana  $V$  merupakan nilai tegangan pada motor *bow thruster*, nilai  $I$  merupakan nilai arus stator dan  $P$  merupakan daya output pada motor *bow thruster*. Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik

**c. Tabel Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Putaran Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)**

Tabel 19. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Putaran Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)

Tipe Kondisi	Kecepatan Putaran Motor pada berbagai VUF				
	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	1493	1493	1493	1492	1492
2-UV	1494	1493	1493	1492	1492
1-UV	1494	1494	1494	1492	1492
1-OV	1494	1494	1494	1493	1493
2-OV	1495	1495	1494	1493	1493
3-OV	1495	1495	1495	1494	1493

Grafik 1. Hubungan antara Putaran Motor terhadap Berbagai Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan



Dari Tabel 19 dan Grafik 2 menunjukkan hubungan antara putaran motor dengan berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan. Tabel 19 menunjukkan perbandingan antara nilai arus stator dengan berbagai faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) di segala kondisi. Di tabel 19 nilai putaran motor terkecil senilai 1492 rpm terdapat pada faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *undervoltage 3 phase*. Sedangkan untuk nilai putaran motor terbesar senilai 1495 rpm terdapat pada faktor ketidak seimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *overvoltage 3 phase*.

Pada grafik 2 dapat dilihat bahwa tiap kondisi ketidakseimbangan tegangan mengakibatkan perubahan putaran motor *bow thruster* namun dengan karakteristik yang berbeda-beda. Seperti pada kondisi *undervoltage* putaran motor mengalami penurunan selama terjadinya ketidakseimbangan tegangan. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa putaran motor akan menurun ketika tegangan suplai terjadi penurunan. Berbeda dengan kondisi *overvoltage* kecepatan motor mengalami peningkatan selama terjadinya ketidakseimbangan tegangan yang berada diatas nilai tegangan nominalnya

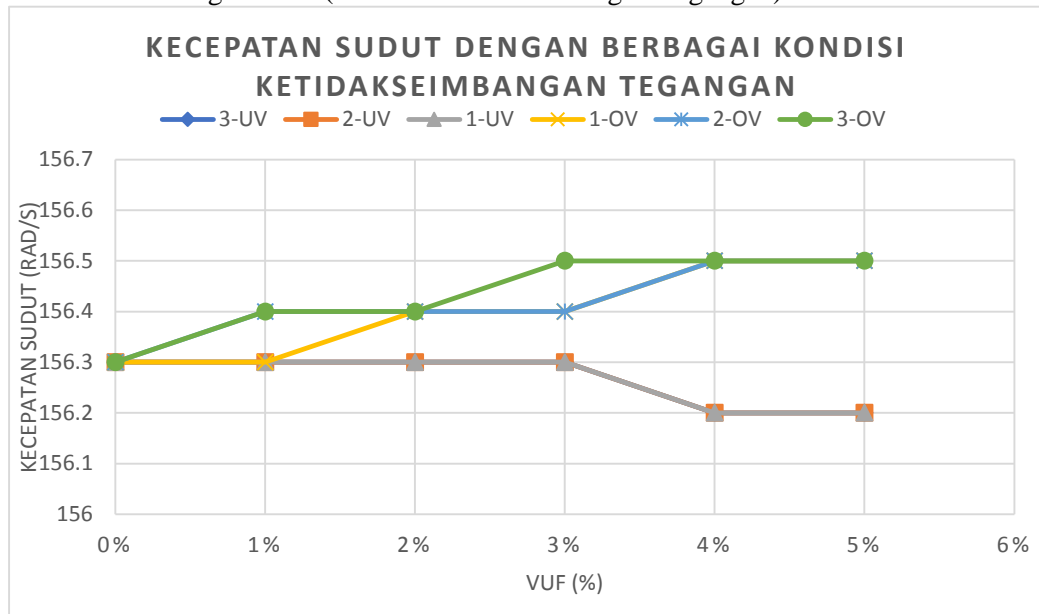
**d. Tabel Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Putaran Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)**

Tabel 20. Hasil Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Sudut Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)

Tipe	Kecepatan $\omega_s$ pada berbagai VUF					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	156.3	156.3	156.3	156.3	156.2	156.2
2-UV	156.3	156.3	156.3	156.3	156.2	156.2
1-UV	156.3	156.3	156.3	156.3	156.2	156.2
1-OV	156.3	156.3	156.4	156.4	156.5	156.5
2-OV	156.3	156.4	156.4	156.4	156.5	156.5
3-OV	156.3	156.4	156.4	156.5	156.5	156.5

Tabel 20 menunjukkan perbandingan antara nilai kecepatan sudut motor dengan berbagai faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) di segala kondisi. Di tabel 20 nilai putaran motor terkecil senilai 156.2 rad/detik terdapat pada faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *undervoltage 3 phase*. Sedangkan untuk nilai putaran motor terbesar senilai 156.5 rad/detik terdapat pada faktor ketidak-seimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *overvoltage 3 phase*.

Grafik 2. Hubungan antara Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan antara Kecepatan Sudut Motor dengan VUF (Faktor Ketidakseimbangan Tegangan)



Pada Grafik 3 menunjukkan karakteristik hubungan kecepatan sudut motor dengan berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan. Ketika motor *bow thruster* dalam kondisi *undervoltage* terlihat penurunan nilai kecepatan sudut motor untuk segala kondisi *undervoltage*, baik kondisi *undervoltage-1phase*, *undervoltage-2phase*, and *undervoltage-3phase*. Semakin besar faktor ketidakseimbangan tegangan maka akan semakin menurun nilai kecepatan sudut motor untuk kondisi *undervoltage*. Hal ini terjadi karena nilai tegangan pada motor *bow thruster* semakin menurun sehingga menyebabkan putaran motor juga mengalami penurunan. Putaran motor menurun maka kecepatan sudut motor juga mengalami penurunan. Hal ini dibuktikan dengan rumus:

$$\omega = 2 \times \Pi \times \text{rps}$$

Dimana:

$\omega$  = kecepatan sudut motor *bow thruster*

$\Pi$  = konstanta yang bernilai 22/7 atau 3.14

rps = putaran motor dalam satuan *rotation per second*

Berbeda dengan kondisi motor *bow thruster* dalam kondisi *overvoltage*, terlihat bahwa nilai kecepatan sudut motor *bow thruster* mengalami kenaikan, baik kondisi *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase*. Untuk kondisi *overvoltage* semakin besar faktor ketidaksimbangan tegangan maka akan semakin besar pula nilai kecepatan sudut pada motor. Hal ini terjadi karena nilai tegangan akan semakin besar dari nilai tegangan nominal motor dan nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai putaran motor dan kecepatan sudut motor.

#### 4.4 Perhitungan Data

Pada tahap selanjutnya dilakukan perhitungan data dari hasil simulasi untuk mendapatkan nilai daya keluaran motor (Pout), torsi motor, daya masukan (Pin), daya reaktif motor, dan power faktor motor. Untuk mendapatkan beberapa data tersebut, diperlukan langkah perhitungan yang di komputasikan ke matlab. Berikut ini langkah-langkah perhitungannya.

4.4.1. Menghitung nilai Slip motor

$$\begin{aligned} S &= (N_s - N_r) / N_s \\ &= (1500 - 1493) / 1500 \\ &= 0.0047 \end{aligned}$$

4.4.2. Menghitung nilai impedansi urutan positif (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} Z_p &= R_s + jX_s + \frac{(jX_m)(\frac{R_r}{s} + jX_r)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \\ &= 0.263413 \end{aligned}$$

4.4.3. Menghitung nilai impedansi urutan negative (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} Z_n &= R_s + jX_s + \frac{(jX_m)(\frac{R_r}{2-s} + jX_r)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \\ &= 0.03798 \end{aligned}$$

4.4.4. Menghitung nilai arus urutan positif (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{ps} &= \frac{V_p}{Z_p} \\ &= 820.09 \end{aligned}$$

4.4.5. Menghitung nilai arus urutan negative (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{pr} &= I_{ps} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \\ &= 75.717768 \end{aligned}$$

4.4.6. Menghitung nilai arus perfasa (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{as} &= (I_{ps} + I_{pr}) / K \\ &= 288.9672547 \text{ Ampere} \\ *K &= \text{Belitan Rotor/Belitan Stator} = 1.67 \end{aligned}$$

4.4.7. Menghitung nilai arus perfasa (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{bs} &= (a^2 I_{ps} + a I_{pr}) / K \\ &= 274.031076 \text{ Ampere} \\ *K &= \text{Belitan Rotor/Belitan Stator} = 1.67 \end{aligned}$$

4.4.8. Menghitung nilai arus perfasa (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{cs} &= (a I_{ps} + a^2 I_{pr}) / K \\ &= 257.955531 \text{ Ampere} \\ *K &= \text{Belitan Rotor/Belitan Stator} = 1.67 \end{aligned}$$

4.4.9. Menghitung nilai arus perfasa (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} I_{cs} &= (a I_{ps} + a^2 I_{pr}) / K \\ &= 257.955531 \text{ Ampere} \\ *K &= \text{Belitan Rotor/Belitan Stator} = 1.67 \end{aligned}$$

4.4.10. Menghitung nilai Daya Input (operasi dalam bentuk polar)

$$\begin{aligned} P_{in} &= \text{Re} [3 (V_p \cdot I_{ps}^* + V_n \cdot I_{ns}^*)] \\ &= 82787.292396 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.4.11. Menghitung nilai Daya Reaktif (operasi dalam bentuk polar)

$$Q_{in} = Im [3 (V_p \cdot I_{ps} * + V_n \cdot I_{ns} *)]$$

$$= 82637.408883 \text{ Watt}$$

4.4.12. Menghitung nilai Faktor daya

$$f_{faktor \text{ daya}} = \cos[ \tan^{-1} (\frac{Q_{in}}{P_{in}})]$$

$$= 0.7077$$

4.4.13. Menghitung nilai Daya Output (operasi dalam bentuk polar)

$$P_{out} = 3 I_{pr}^2 \times (\frac{1-s}{s}) R_r + 3 I_{nr}^2 \times (\frac{s-1}{2-s}) R_r$$

$$= 44814.609970 \text{ watt}$$

4.4.14. Menghitung nilai Torsi (operasi dalam bentuk polar)

$$T = T_p + T_n = \frac{3 R_r}{\omega s} \times (\frac{I_{pr}^2}{s} - \frac{I_{nr}^2}{2-s})$$

$$= 290.122151 \text{ Nm}$$

#### 4.5 Analisa Tabel Perhitungan

4.5.1 Hasil Perhitungan untuk Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) 1%

Tabel 21. Hasil perhitungan untuk VUF 1% di Beberapa Kondisi

Tipe Kondisi	VUF (%)	Ia	Ib	Ic	Rata-Rata Arus	Pout (P)	Torsi
3-UV	1%	466.3414	484.58	503.4713	484.7975	50456.92	322.821
2-UV	1%	463.1239	507.4773	516.074	495.5584	49085.58	314.0472
1-UV	1%	454.5328	506.2131	487.1664	482.6375	47966.65	306.8883
1-OV	1%	446.78	473.5444	499.5905	473.305	42165.31	269.7717
2-OV	1%	495.3724	469.7676	442.2095	469.1165	39085.58	249.9078
3-OV	1%	439.7571	462.4762	484.7629	462.3321	32016.38	204.7083
Pin (S)	Qin (Q)	Pf					
90380.64	73211.02	0.777					
86542.64	76761.21	0.74812					
75655.25	72287.37	0.723017					
72363.21	69140.91	0.723021					
72011.01	68317.86	0.725465					
71716.97	68519.18	0.723043					

Pada tabel 21 terlihat bahwa nilai daya keluaran motor terbesar senilai 50456.92 watt memiliki torsi terbesar senilai 322.146 Nm dan power faktor 0.777 ada pada kondisi *undervoltage-3phase*. Sedangkan untuk nilai daya keluaran motor terkecil senilai 32016.38 watt memiliki nilai torsi terendah sebesar 204.8393 Nm dan power faktor 0.723043 ada pada kondisi *overvoltage-3phase*. Sedangkan aturan IEC yang mengatur ketidakseimbangan tegangan power faktor yang diijinkan apabila masih berada

di nilai 0.75 keatas. Berdasarkan tabel 21 terlihat bahwa ada power faktor yang tidak memenuhi standard IEC yaitu pada kondisi *undervoltage-2phase*, *undervoltage-1phase*, *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase* dengan nilai yang berturut-turut sebesar 0.723017; 0.723021; 0.723043; 0.725465; 0.74812

#### 4.5.2 Hasil Perhitungan MATLAB untuk Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF%) 2%

Tabel 22. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 2% di Beberapa Kondisi

Tipe Kondisi	VUF (%)	Ia	Ib	Ic	Rata-Rata Arus	Pout (P)
3-UV	2%	450.9913	517.4842	541.712	503.3958	51477.58
2-UV	2%	450.476	483.6745	554.086	496.0788	50237.48
1-UV	2%	440.3463	524.5726	495.3841	486.7677	48176.53
1-OV	2%	421.3567	473.0765	518.9609	471.1314	41249.78
2-OV	2%	512.4911	466.6644	417.0169	465.3908	34237.48
3-OV	2%	498.1667	459.8976	413.3293	457.1312	24966.65
Torsi	Pin (S)	Qin (Q)	Pf			
329.3511	89923.14	74469.29	0.770183			
321.417	87742.61	79480.4	0.74114			
308.2311	78297.95	74837.01	0.722903			
263.7454	76103.71	72809.96	0.72257			
218.9097	68553.09	66002.68	0.72038			
159.6333	66548.58	44377.32	0.831983			

Pada tabel 22 terlihat bahwa nilai daya keluaran motor terbesar senilai 51477.58 watt memiliki torsi terbesar senilai 329.1405 Nm dan power faktor 0.722903 ada pada kondisi *undervoltage-3phase*. Sedangkan untuk nilai daya keluaran motor terkecil senilai 24966.65 watt memiliki nilai torsi terendah sebesar 159.7354 Nm dan power faktor 0.723043 ada pada kondisi *overvoltage-3phase*. Sedangkan aturan IEC yang mengatur ketidakseimbangan tegangan power faktor yang diijinkan apabila masih berada di nilai 0.75 keatas. Berdasarkan tabel 22 terlihat bahwa ada power faktor yang tidak memenuhi standard IEC yaitu pada kondisi *undervoltage-2phase*, *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase* dengan nilai yang berturut-turut sebesar 0.722903; 0.72257; 0.72038; 0.74114

#### 4.5.3 Hasil Perhitungan MATLAB untuk Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF%) 3%

Tabel 23. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 3% di Beberapa Kondisi

Tipe Kondisi	VUF (%)	Ia	Ib	Ic	Rata-Rata Arus	Pout (P)
3-UV	3%	437.4542	498.703	589.2562	508.4711	52289.68
2-UV	3%	433.069	527.4048	599.0248	519.8329	52090.38
1-UV	3%	407.8433	566.3112	514.5835	496.246	48855.68
1-OV	3%	394.9176	473.2762	539.3154	469.1697	40403.33
2-OV	3%	529.3209	461.74	376.6717	455.9109	33090.38
3-OV	3%	367.4286	528.0857	449.6343	448.3829	24289.68
Torsi		Pin (S)	Qin (Q)	Pf		
334.5469		89241.93	72750.38	0.775087		
333.2718		84056.58	80470.61	0.722347		
312.5763		80299.8	76908.33	0.722193		
258.3333		72493.31	53482.9	0.804702		
211.5753		71892.85	69251.26	0.720215		
155.2056		58830.28	56707.45	0.719977		

Pada tabel 23 terlihat bahwa nilai daya keluaran motor terbesar senilai 52289.68 watt memiliki torsi terbesar senilai 334.1194 Nm dan power faktor 0.719977 ada pada kondisi *undervoltage-3phase*. Sedangkan untuk nilai daya keluaran motor terkecil senilai 24289.68 watt memiliki nilai torsi terendah sebesar 155.4042 Nm dan power faktor 0.719977 ada pada kondisi *overvoltage-3phase*. Sedangkan aturan IEC yang mengatur ketidakseimbangan tegangan power faktor yang diijinkan apabila masih berada di nilai 0.75 keatas. Berdasarkan tabel 23 terlihat bahwa ada power faktor yang tidak memenuhi standard IEC yaitu pada kondisi *undervoltage-3phase*, *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase* dengan nilai yang berturut-turut sebesar 0.722347; 0.722193; 0.720215; 0.719977



#### 4.5.4 Hasil Perhitungan MATLAB untuk Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF%) 4%

Tabel 24. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 4% di Beberapa Kondisi

Tipe Kondisi	VUF (%)	Ia	Ib	Ic	Rata-Rata Arus	Pout (P)
3-UV	4%	424.0009	532.368	634.4773	530.282	53146.87
2-UV	4%	415.6652	525.0031	627.6862	522.7848	53021.52
1-UV	4%	392.5928	599.2084	518.746	503.5157	49309.21
1-OV	4%	361.3974	473.1268	568.7514	467.7586	39592.01
2-OV	4%	551.0834	459.3115	340.9467	450.4472	32146.87
3-OV	4%	334.4914	524.3029	470.6674	443.1539	23021.52
Torsi	Pin (S)	Qin (Q)	Pf			
340.2489	87924.18	84304.96	0.721807			
339.4464	85512.43	82005.61	0.721751			
315.68	76759.28	67885.43	0.749079			
252.9841	76565.59	56883.64	0.802712			
205.4113	74574.35	71882.44	0.719982			
147.1024	54195.68	52611.78	0.717514			

Pada tabel 24 terlihat bahwa nilai daya keluaran motor terbesar senilai 53021.521159 watt memiliki torsi terbesar senilai 338.7957 Nm dan power faktor 0.717514 ada pada kondisi *undervoltage-3phase*. Sedangkan untuk nilai daya keluaran motor terkecil senilai 23021.52115 watt memiliki nilai torsi terendah sebesar 147.3849 Nm dan power faktor 0.719977 ada pada kondisi *overvoltage-3phase*. Sedangkan aturan IEC yang mengatur ketidakseimbangan tegangan power faktor yang diijinkan apabila masih berada di nilai 0.75 keatas. Berdasarkan tabel 24 terlihat bahwa ada power faktor yang tidak memenuhi standard IEC yaitu pada kondisi *undervoltage-3phase*, *undervoltage-2phase*, *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase* dengan nilai yang berturut-turut sebesar 0.721807; 0.721751; 0.719982; 0.749079; 0.717514

#### 4.5.5 Hasil Perhitungan MATLAB untuk Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF%) 5%

Tabel 25. Hasil perhitungan MATLAB untuk VUF 5% di Beberapa Kondisi

Tipe Kondisi	VUF (%)	Ia	Ib	Ic	Rata-Rata Arus	Pout (P)
3-UV	5%	546.603	696.7053	411.5358	551.6147	55660.9
2-UV	5%	544.3082	679.4004	393.9654	539.2246	54353.44
1-UV	5%	633.9652	536.9134	366.8453	512.5747	49524.93
1-OV	5%	342.7372	465.9886	593.5387	467.4215	37170.31
2-OV	5%	470.8685	300.8804	559.2319	443.6603	31353.44
3-OV	5%	456.324	310.2962	562.5359	443.052	22321.59
Torsi	Pin (S)	Qin (Q)	Pf			
356.3438	100345.8	97706.07	0.716468			
347.9734	98174.48	85170.36	0.755362			
316.4532	93959.62	78603.23	0.767001			
237.51	83406.98	69849.86	0.720583			
200.3415	79792.05	67741.11	0.762326			
142.9039	66410.12	63831.03	0.720968			

Pada tabel 25 terlihat bahwa nilai daya keluaran motor terbesar senilai 55660.9 watt memiliki torsi terbesar senilai 355.66 Nm dan power faktor 0.755362 ada pada kondisi *undervoltage-3phase*. Sedangkan untuk nilai daya keluaran motor terkecil senilai 22321.587178 watt memiliki nilai torsi terendah sebesar 142.9039 Nm dan power faktor 0.762326 ada pada kondisi *overvoltage-3phase*. Sedangkan aturan IEC yang mengatur ketidakseimbangan tegangan power faktor yang diijinkan apabila masih berada di nilai 0.75 keatas. Berdasarkan tabel 25 terlihat bahwa ada power faktor yang tidak memenuhi standard IEC yaitu pada kondisi *undervoltage-2phase*, *undervoltage-1phase*, *overvoltage-1phase* dengan nilai yang berturut-turut sebesar 0.716468; 0.7209683; 0.720583

#### 4.5.6 Perbandingan Nilai Perhitungan Nilai Arus terhadap Nilai Arus Hasil Simulasi

Tabel 26. Hubungan antara Nilai Arus Hasil Simulasi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi

Tipe	Rata-rata nilai arus stator					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	482.4	495.9667	500.4	512.4	519.5667	520.8333
2-UV	482.4	489.7333	497.3	505.2667	512.2667	519.5667
1-UV	482.4	480.5333	481.3333	482.7	488.4333	505.9667
1-OV	482.4	477.5333	474.7333	474.3333	474.0667	449.6667
2-OV	482.4	473.7333	470.5333	465.4667	462.3	403.4
3-OV	482.4	463.7	462.3	426.5667	417.2667	403.1333

Tabel 27. Hubungan antara Nilai Arus Hasil Perhitungan terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi

Tipe	Rata-rata nilai arus stator					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	482.4	484.7975	503.3958	519.8329	530.282	551.6147
2-UV	482.4	495.5584	496.0788	508.4711	522.7848	539.2246
1-UV	482.4	482.6375	486.7677	496.246	503.5157	512.5747
1-OV	482.4	473.305	471.1314	469.1697	467.7586	467.4215
2-OV	482.4	469.1165	465.3908	455.9109	450.4472	443.6603
3-OV	482.4	462.3321	457.1312	448.3829	443.1539	443.052

Pada tabel 26 dan tabel 27 dapat dilihat nilai rata-rata nilai arus stator untuk setiap kondisi dengan variasi faktor ketidakseimbangan tegangan. Di tabel 26 dapat dilihat bahwa rata-rata arus stator mengalami penurunan dari kondisi 3 fasa *undervoltage* hingga kondisi 3 fasa *overvoltage*. Untuk nilai terkecil tegangan terdapat pada kondisi 3 fasa *overvoltage*. Hal ini sesuai dengan rumus:

$$P = V I \cos \theta.$$

Dimana: V merupakan nilai tegangan pada motor *bow thruster*,  
 I merupakan nilai arus stator  
 P merupakan daya output pada motor *bow thruster*.

Jadi apabila nilai daya output motor merupakan nilai yang tetap, maka apabila nilai tegangan semakin kecil, maka nilai arus semakin besar. Apabila nilai tegangan semakin besar maka nilai arus juga semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan nilai tegangan dan nilai arus berbanding terbalik. Hasil rata-rata arus stator pada simulasi memperlihatkan bahwa perbandingan hasil rata-rata arus stator tidak begitu jauh hanya selisih kurang dari 50. Ini dapat di buktikan dengan menghitung nilai error antara hasil rata-rata arus stator simulasi dengan hasil rata-rata arus stator perhitungan. Berikut ini tabel 28 merupakan tabel nilai error:

Tabel 28. Rata-rata nilai Error Arus Stator

Tipe	Rata-rata nilai Error Arus Stator					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	0%	2.304%	0.595%	1.430%	2.021%	5.580%
2-UV	0%	1.175%	0.246%	0.630%	2.012%	3.646%
1-UV	0%	0.436%	1.116%	2.730%	2.995%	1.289%
1-OV	0%	0.893%	0.765%	1.101%	1.349%	3.798%
2-OV	0%	0.984%	1.105%	2.096%	2.631%	9.075%
3-OV	0%	0.296%	1.131%	4.866%	5.842%	9.010%

Pada tabel 28 dapat dilihat bahwa terdapat nilai error perhitungan yang melebihi batas 5% yaitu pada kondisi *3-phase overvoltage* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan sebesar 4% senilai 5.842%. Pada faktor ketidakseimbangan tegangan 5% terdapat nilai error perhitungan yang melebihi batas 5% yaitu pada kondisi *3phase-undervoltage*, *2phase overvoltage*, *3 phase overvoltage* dengan nilai berturut-turut 5.580%; 9.075%, 9.010%

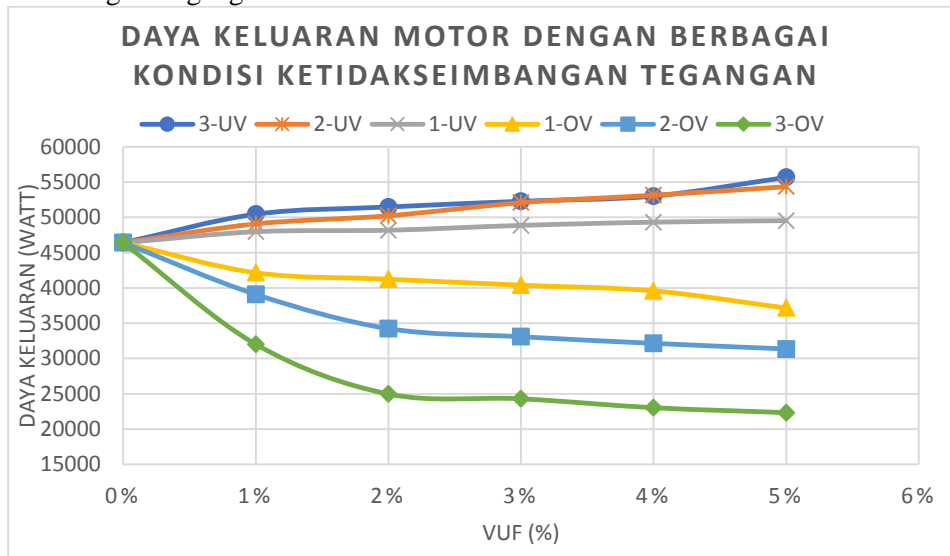
#### 4.5.7 Perbandingan Nilai Daya Keluaran terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi

Tabel 29. Hubungan antara Daya Keluaran terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi

Tipe	Daya Keluaran pada berbagai VUF					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	46425.7	50456.92	51477.58	52289.68	53021.52	55660.9
2-UV	46425.7	49085.58	50237.48	52090.38	53146.87	54353.44
1-UV	46425.7	47966.65	48176.53	48855.68	49309.21	49524.93
1-OV	46425.7	42165.31	41249.78	40403.33	39592.01	37170.31
2-OV	46425.7	39085.58	34237.48	33090.38	32146.87	31353.44
3-OV	46425.7	32016.38	24966.65	24289.68	23021.52	22321.59

Tabel 29 menunjukkan perbandingan antara nilai daya keluaran motor dengan berbagai faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) di segala kondisi. Di tabel 26 nilai daya keluaran terkecil senilai 22321.59 watt terdapat pada faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *undervoltage 3 phase*. Sedangkan untuk nilai daya terbesar senilai 55660.9 watt terdapat pada faktor ketidak seimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *undervoltage 3 phase*. Hal ini menunjukkan bahwa ketika kondisi *undervoltage* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan yang semakin besar maka daya keluaran motor akan mengalami kenaikan. Berbeda dengan kondisi *overvoltage* dengan faktorketidakseimbangan tegangan yang semakin besar maka daya keluaran motor akan semakin kecil.

Grafik 3. Hubungan Daya Keluaran Motor dengan Berbagai Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan



Pada Grafik 4 menunjukkan karakteristik hubungan daya keluaran motor dengan berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan. Ketika motor bow thruster dalam kondisi *overvoltage* terlihat penurunan daya keluaran motor untuk segala kondisi *overvoltage*, baik kondisi *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase*. Semakin besar faktor ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada kondisi tersebut maka akan semakin menurun nilai daya keluaran motor untuk kondisi *overvoltage*. Hal ini terjadi karena nilai tegangan pada motor *bow thruster* semakin kecil pada kondisi *undervoltage* dengan VUF yang semakin meningkat sehingga menyebabkan kenaikan nilai arus dan nilai daya keluaran motor. Pernyataan ini dibuktikan dengan rumus berikut:

$$P_{out} = V I \cos \Phi$$

Dimana:

$P_{out}$  = Daya keluaran motor *bow thruster*

$V$  = Tegangan pada motor *bow thruster*

$I$  = Rata-Rata arus pada motor *bow thruster*

$\cos \Phi$  = faktor daya

Berbeda dengan kondisi motor *bow thruster* dalam kondisi *undervoltage*, terlihat bahwa nilai daya keluaran mengalami kenaikan, baik kondisi *undervoltage-1phase*, *undervoltage-2phase*, and *undervoltage-3phase*. Untuk kondisi *undervoltage* semakin besar faktor ketidakseimbangan tegangan maka akan semakin besar pula nilai daya keluaran motor. Hal ini terjadi karena nilai tegangan akan semakin besar dari nilai tegangan nominal motor dan nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai daya keluar motor.

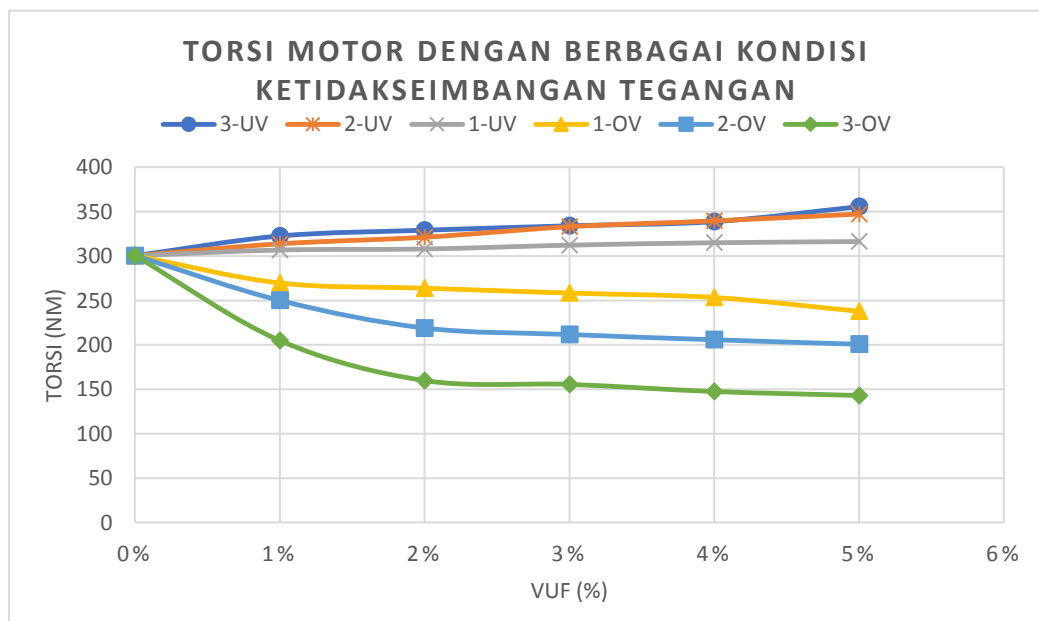
#### 4.5.8 Perbandingan Nilai Torsi terhadap Beberapa (VUF) di Setiap Kondisi

Tabel 30. Hubungan antara Torsi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi

Type	Torsi pada berbagai VUF					
Kondisi	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3-UV	300.5152	322.6146	329.1405	334.1194	338.7957	355.6607
2-UV	300.5152	313.8464	321.2115	333.0587	339.5966	347.3063
1-UV	300.5152	306.8883	308.0341	312.3764	315.0748	316.4532
1-OV	300.5152	269.7717	263.9142	258.4986	253.47	237.9661
2-OV	300.5152	250.0677	219.0498	211.7107	205.8058	200.7263
3-OV	300.5152	204.8393	159.7354	155.4042	147.3849	142.9039

Tabel 27 menunjukkan perbandingan antara nilai Torsi dengan berbagai faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) di segala kondisi. Di tabel 26 nilai torsi terkecil senilai 142.9039 Nm terdapat pada faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *overvoltage 3 phase*. Sedangkan untuk nilai torsi terbesar senilai 355.6607 terdapat pada faktor ketidak seimbangan tegangan (VUF) 5% di kondisi *undervoltage 3 phase*. Hal ini menunjukkan bahwa ketika kondisi *undervoltage* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan yang semakin besar maka torsi akan mengalami peningkatan. Berbeda dengan kondisi *overvoltage* dengan faktorketidakseimbangan tegangan yang semakin besar maka torsi keluaran motor akan semakin besar.

Grafik 4. Hubungan antara Torsi terhadap Beberapa Faktor Ketidakseimbangan Tegangan (VUF) di Setiap Kondisi



Pada Grafik 5 menunjukan karakteristik hubungan torsi motor dengan berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan. Ketika motor bow thruster dalam kondisi *undervoltage* terlihat kenaikan torsi motor untuk segala kondisi *undervoltage*, baik kondisi *undervoltage-1phase*, *undervoltage-2phase*, and *undervoltage-3phase*. Semakin besar faktor ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada kondisi tersebut maka akan semakin mengalami kenaikan nilai torsi motor untuk kondisi *undervoltage*. Hal ini terjadi karena nilai arus pada motor *bow thruster* semakin besar pada kondisi *undervoltage* dengan VUF yang semakin meningkat sehingga menyebabkan kenaikan nilai torsi motor. Pernyataan ini dibuktikan dengan rumus berikut:

$$T = \frac{P}{2\pi (rps)} = \frac{VI \cos \Phi}{2\pi (rps)}$$

Berbeda dengan kondisi motor *bow thruster* dalam kondisi *overvoltage*, terlihat bahwa nilai daya keluaran mengalami penurunan, baik kondisi *overvoltage-1phase*, *overvoltage-2phase*, and *overvoltage-3phase*. Untuk kondisi *overvoltage* semakin besar faktor ketidaksimbangan tegangan maka akan semakin kecil pula nilai torsi motor. Hal ini terjadi karena nilai tegangan akan semakin kecil dari nilai tegangan nominal motor dan nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai torsi motor.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



## BAB V KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi dan perhitungan didapatkan bahwa hubungan antara kondisi ketidakseimbangan tegangan *undervoltage* terhadap faktor ketidakseimbangan yang meningkat menyebabkan terjadinya penurunan nilai tegangan di ketiga kondisi *undervoltage*. Penurunan nilai tegangan pada kondisi *undervoltage* menyebabkan putaran motor akan menurun dan nilai putaran motor berbanding lurus dengan nilai kecepatan sudut. Pada kondisi *undervoltage-3phase* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% nilai putaran motor merupakan nilai putaran terendah yaitu 1492 rpm. Pada kondisi tersebut dengan VUF 5% memiliki nilai kecepatan sudut terendah 156.2 rad/detik. Penurunan nilai tegangan pada kondisi *undervoltage* menyebabkan kenaikan arus. Hal ini disebabkan oleh nilai tegangan yang berbanding terbalik dengan nilai daya keluaran motor. Sedangkan kenaikan arus menyebabkan kenaikan nilai daya motor bow thruster. Kondisi *undervoltage-3phase* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% nilai daya keluaran motor merupakan nilai daya keluaran motor terbesar yaitu 55660.9 watt. Ketika daya keluaran motor meningkat maka nilai torsi yang dihasilkan akan meningkat. Hal ini disebabkan oleh nilai tegangan yang berbanding lurus dengan nilai daya keluaran motor dan nilai daya keluaran motor berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan motor.
2. Dari hasil simulasi dan perhitungan didapatkan bahwa hubungan antara kondisi ketidakseimbangan tegangan *overvoltage* terhadap faktor ketidakseimbangan yang meningkat menyebabkan terjadinya kenaikan nilai tegangan di ketiga kondisi *overvoltage*. Kenaikan nilai tegangan pada kondisi *overvoltage* menyebabkan putaran motor akan meningkatnya. Akibatnya, putaran motor yang meningkat berpengaruh pada kecepatan sudut. Semakin meningkat putaran motor akan semakin meningkat pula nilai kecepatan sudut. Dapat disimpulkan bahwa putaran motor berbanding lurus dengan nilai kecepatan sudut. Pada kondisi *overvoltage-3phase* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% nilai putaran motor merupakan nilai putaran terbesar yaitu 1495 rpm. Pada kondisi tersebut dengan VUF 5% memiliki nilai kecepatan sudut terbesar yaitu 156.5 rad/detik. Kenaikan nilai tegangan pada kondisi *overvoltage* menyebabkan arus pada motor akan semakin besar nilainya. Hal ini disebabkan oleh nilai tegangan yang berbanding terbalik dengan nilai arus motor. Sedangkan daya motor berbanding lurus dengan nilai arus pada motor. Pada kondisi *overvoltage-3phase* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% nilai daya keluaran motor merupakan nilai daya keluaran motor terbesar yaitu 55660.9 watt. Ketika daya keluaran motor meingkat maka nilai torsi yang dihasilkan akan meningkat. Di kondisi *3phase-overvoltage* dengan faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) 5% nilai daya keluaran motor merupakan nilai daya keluaran motor terendah yaitu 22321.587178 watt.

3. Sedangkan untuk nilai faktor daya mengalami kenaikan dan penurunan yang fluktuatif. Hal ini terjadi karena faktor daya dipengaruhi oleh daya input motor dan daya reaktif motor. Daya reaktif yang terjadi pada motor mengalami kenaikan dan penurunan fluktuatif. Ada beberapa nilai faktor daya yang tidak memenuhi standar aturan IEC yaitu nilai power faktor yang berada di bawah nilai 0.75. Untuk mengatasi nilai power faktor yang berada dibawah standar dapat dilakukan dengan menambahkan kapasitor bank 65 kVAR maka akan menaikkan nilai power faktor sehingga tidak dibawah standar IEC. Namun perlu di ingat bahwa ketidakseimbangan juga mengakibatkan ketidakseragaman nilai arus, dimana beberapa dari nilai tersebut berada diatas nilai nominalnya, hal ini dapat berakibat buruk bagi motor.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang bias diberikan dari hasil tugas akhir ini adalah:

1. Disarankan agar melakukan percobaan ketidakseimbangan tegangan secara langsung dan secara praktikum terhadap motor yang akan dianalisa
2. Disarankan agar mencoba kondisi ketidakseimbangan yang berbeda untuk setiap fasa R, fasa S, dan fasa T, karena perbedaan fasa juga menyebabkan perubahan nilai arus perfasa, daya keluaran motor perfasa, juga torsi
3. Disarankan agar dapat mencoba kondisi ketidakseimbangan yang berbeda dengan menggabungkan beberapa kondisi ketidakseimbangan tegangan

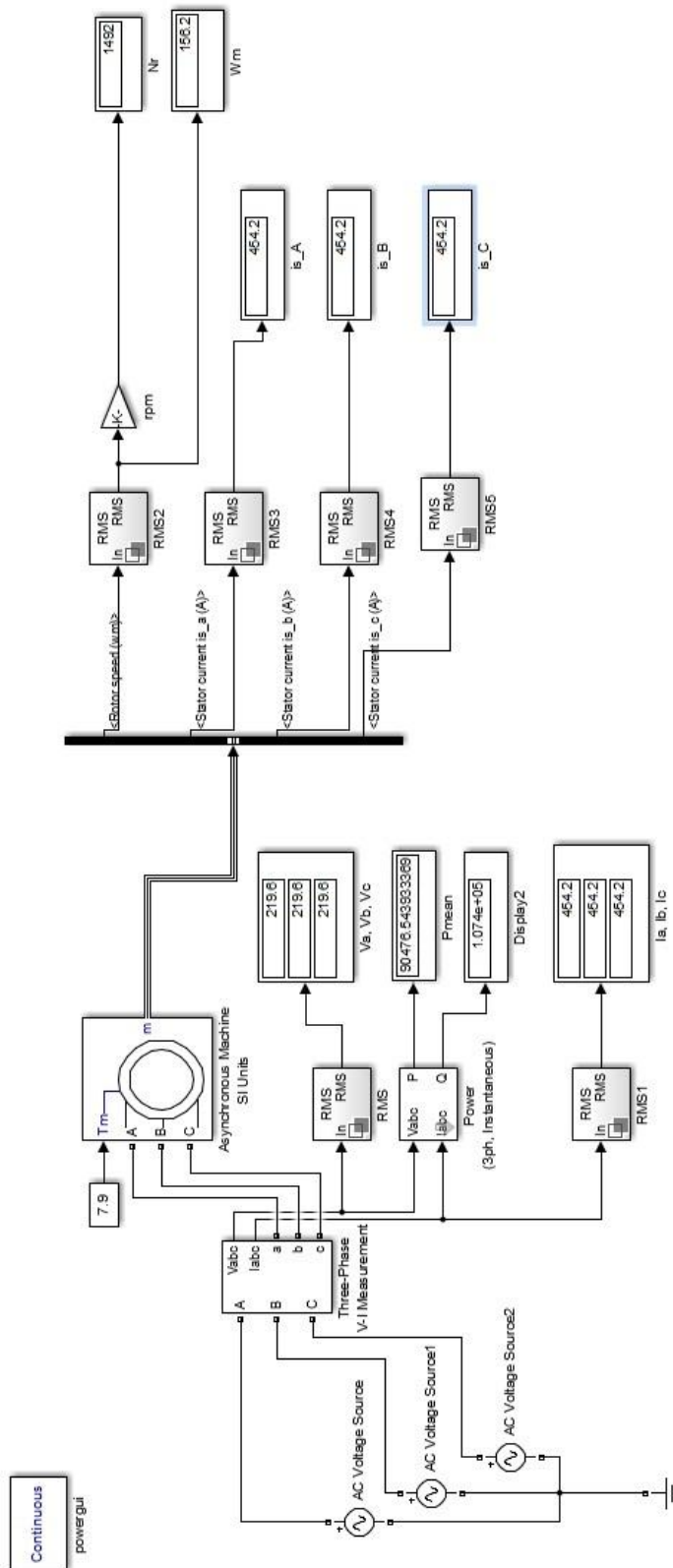
## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Muntashir Aulia, Zulkarnaen Pane, 2014. Pengaruh Variasi Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa dengan Nilai Faktor Ketidakseimbangan Tegangan yang Sama. *DTE FT USU*, Volume 9. No 1, p. 6.
- Jouanne, A. V., 2001. Assesment of Voltage UNbalanced. *IEEE* , 16. NO.4 (TRANSACTION ON POWER DELIEVERY), p. 9.
- Lee, C.-Y., 1999 . Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 14, No. 2, p. 7.
- Mahrizal Masri, Pardeman Simurat, Suwarno, 2010. Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa dengan Matlab. *SNPPTI*, Volume ISSN-2086 2156, p. 6.
- Makbul Anwari, Ayong Hiendra, 2010. New Unbalance Factor for Estimating Performance of a Three-Phase Induction Motor With Under- and Overvoltage Unbalance. *IEEE*, 25 No. 3(Transaction on Energy Conversion), p. 7.
- Maulana, I., 2010. *Analisa Performa Bow Thruster dengan Penggerak Hidrolik dengan Penggerak Elektik*, Jakarta: digilib unsada.
- P. Pillay, M. M., 2001. Definitions of Unbalance Voltages. Volume 0272-1724/01.
- Sardono Sarwito, Achmad Suherman, 2017. Analysis of Three Phase Asynchronous Slip Ring Motor Performance Feedback Type 243. *IJMEIR*, Volume 2, p. 8.
- Theraja, 1978. *A Text-book of Electrical Technology, 17th*. 17th Revised penyunt. New Delhi: Chand & Company Ltd.
- V.K Mehta, Rohit Mehta, 2002. *Principles of Electrical Machines*. India: s.n.
- Wijaya, M., 2001. *Dasar - Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.
- Zuhal, 1988. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama .

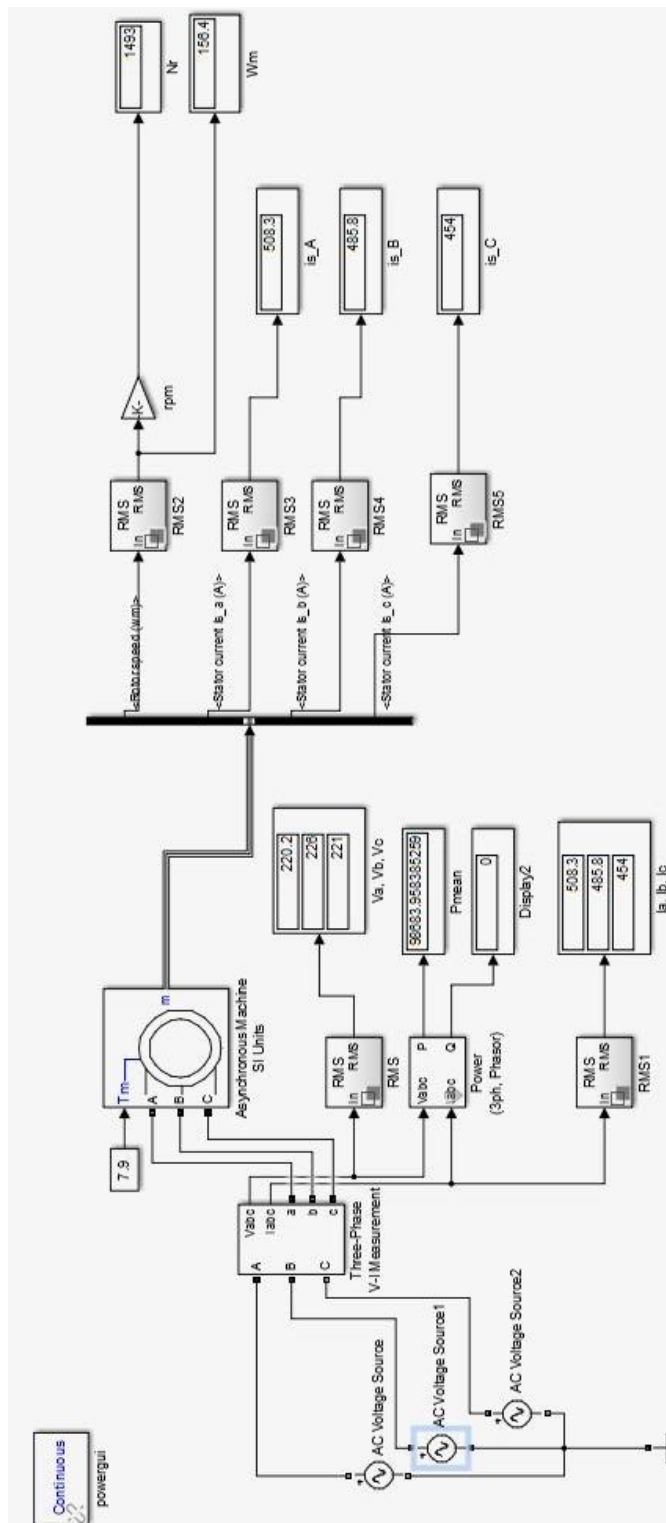
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## LAMPIRAN

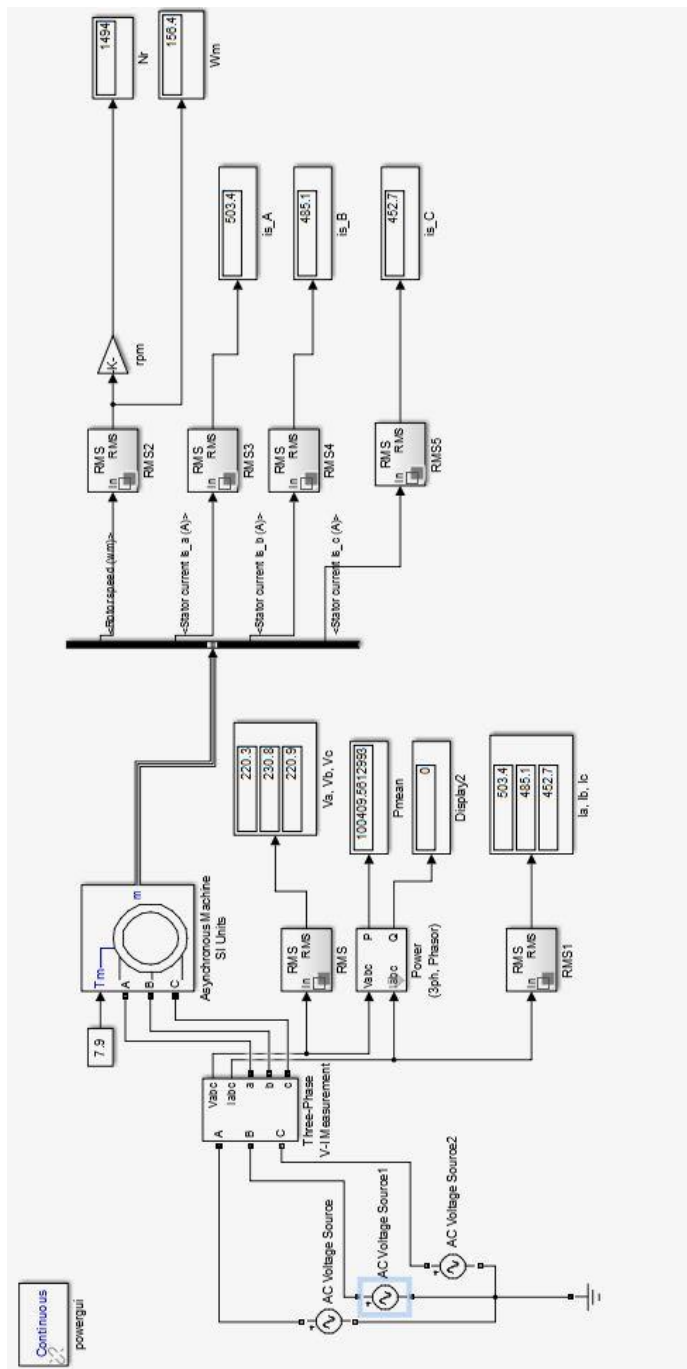
### Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi Seimbang



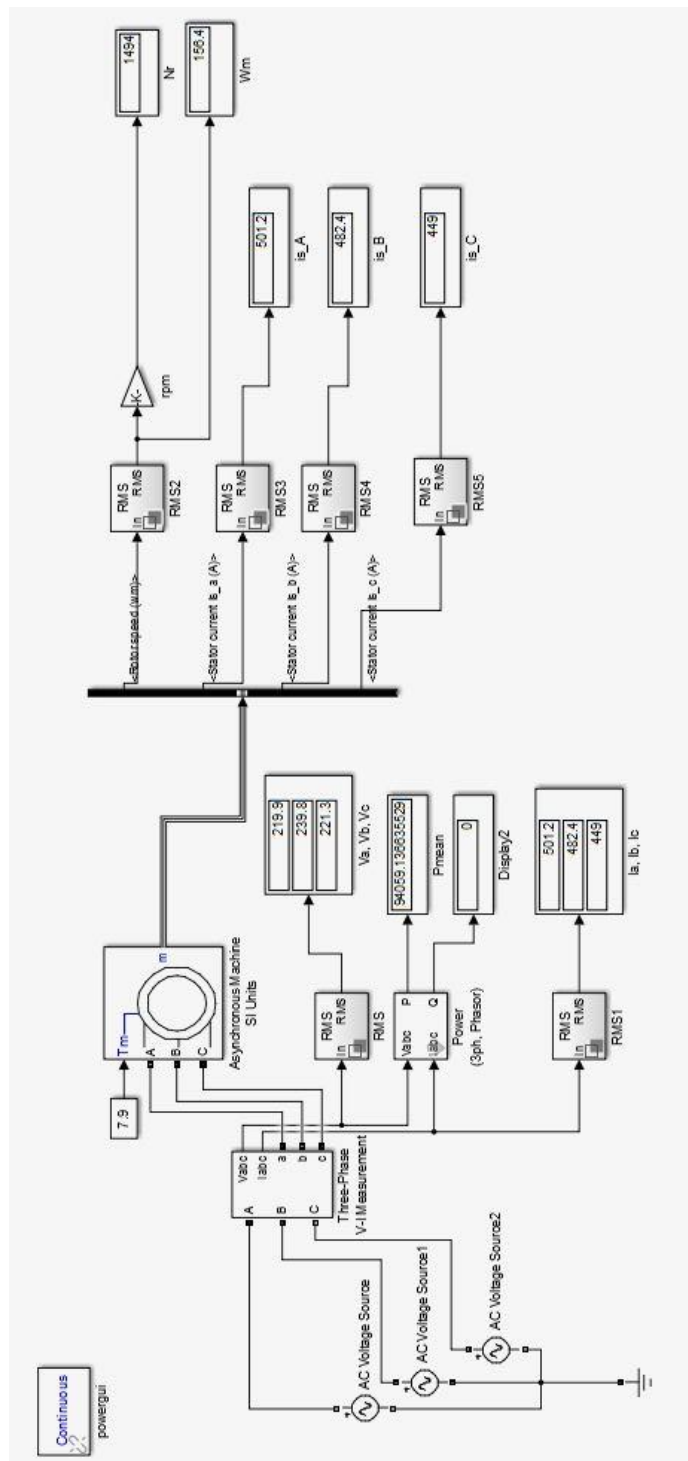
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-1phase* dengan VUF 1%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-1phase* dengan VUF 2%



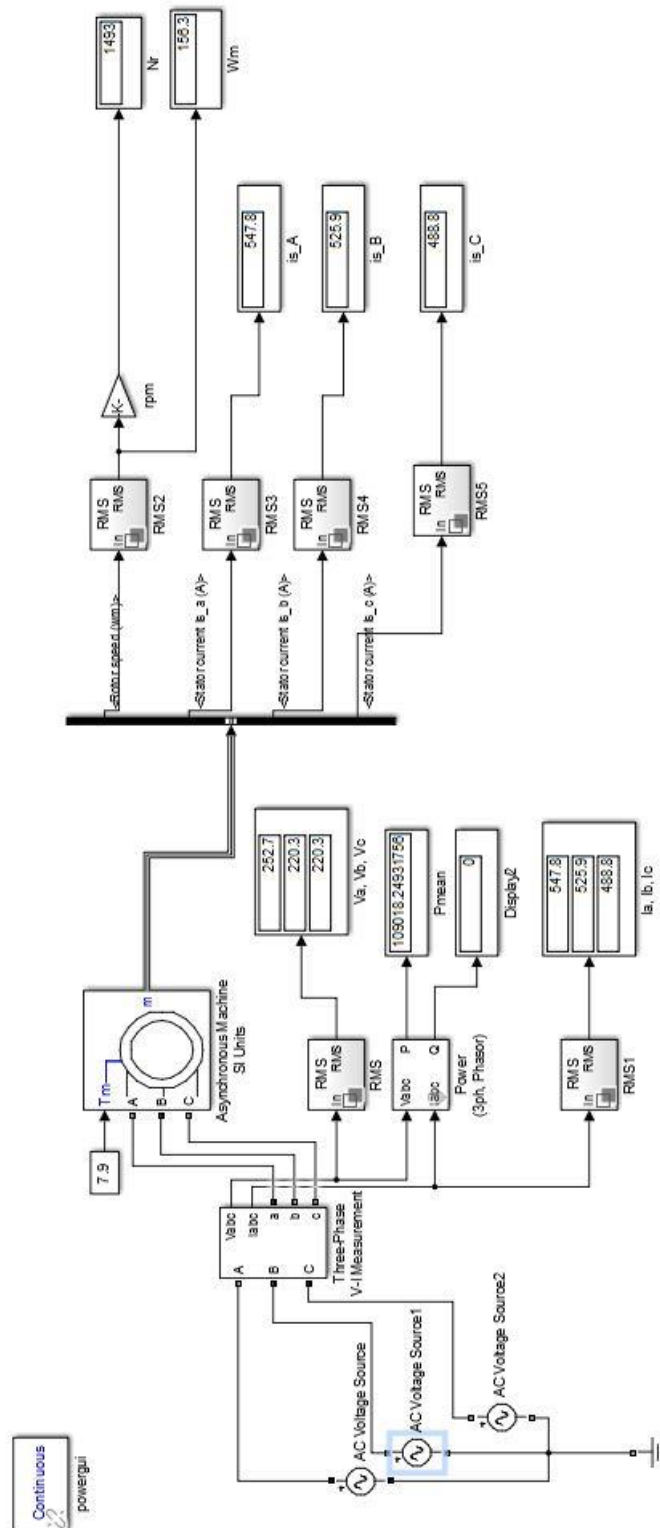
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-1phase* dengan VUF 3%



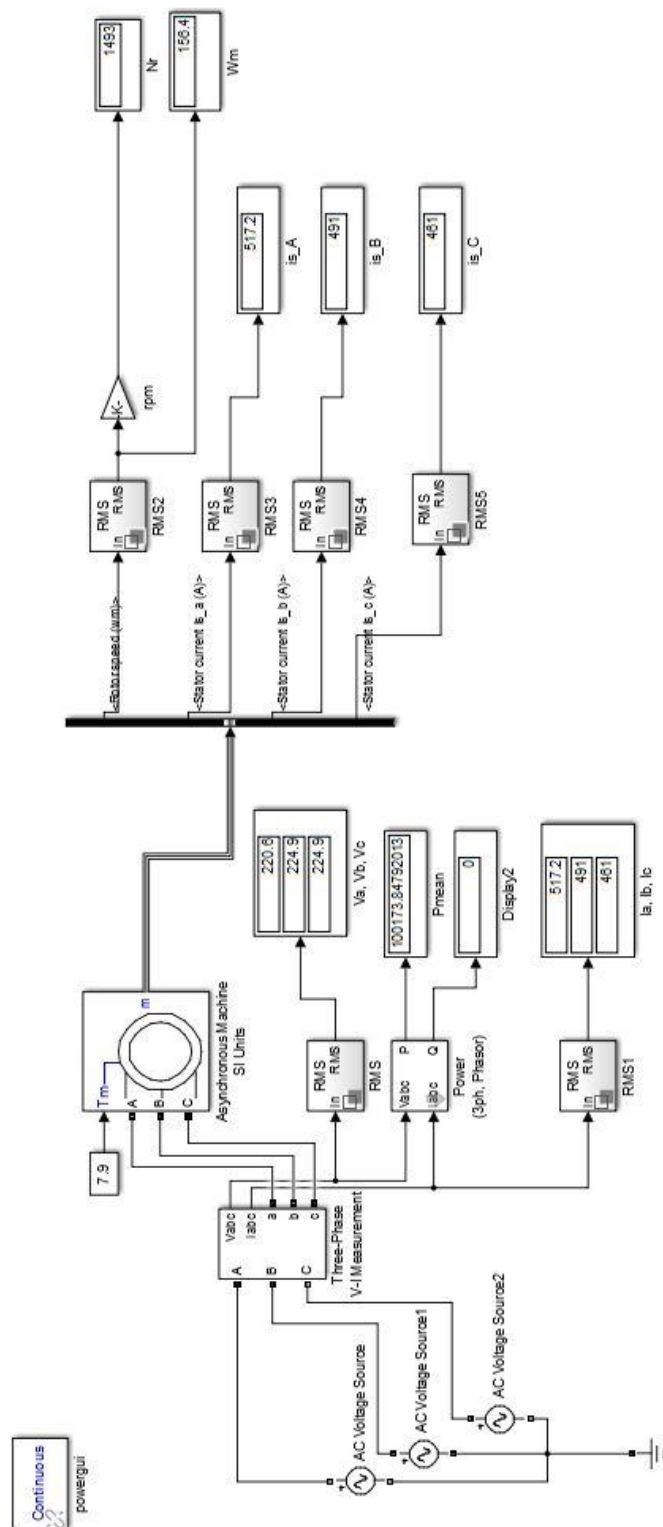




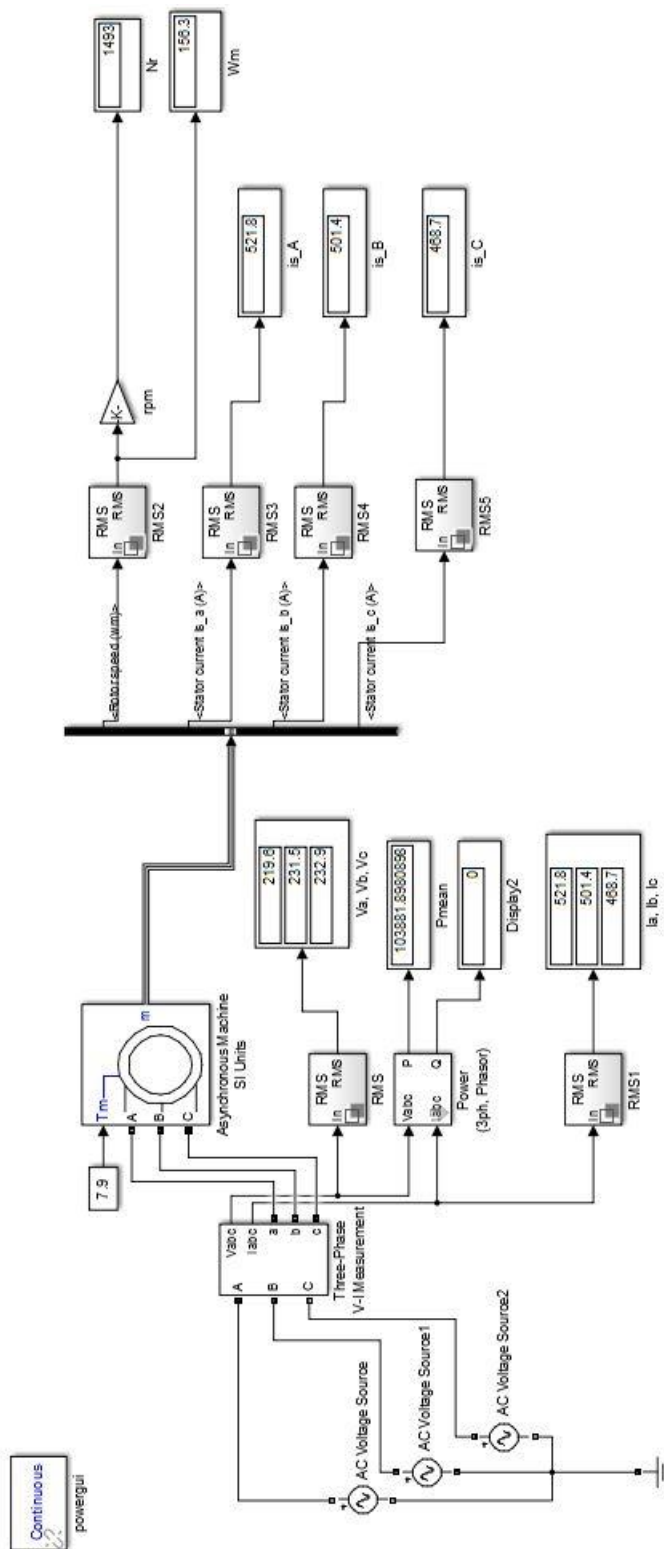
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-1phase* dengan VUF 5%



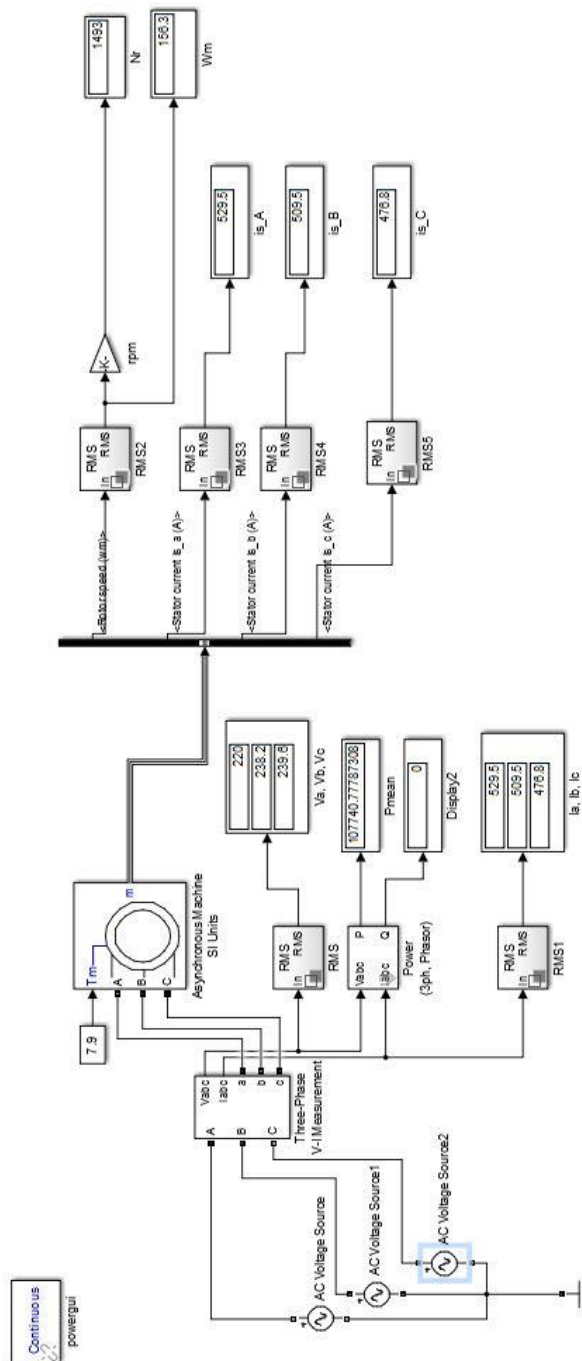
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-2phases* dengan VUF 1%



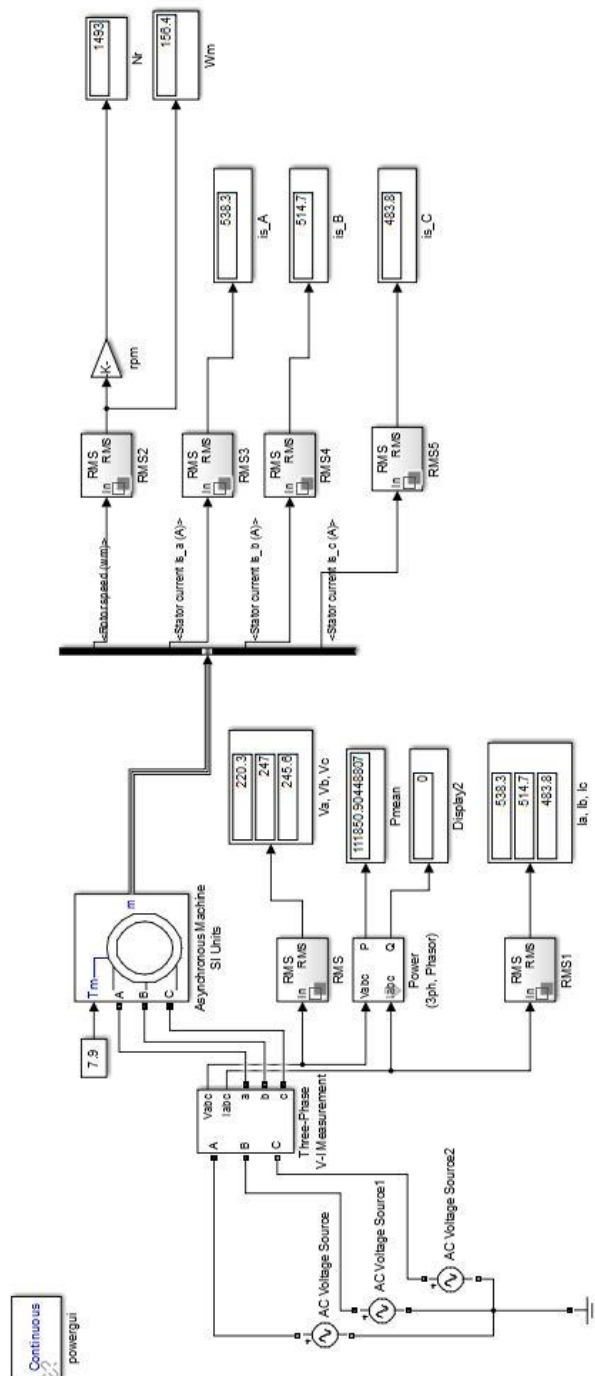
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-2phases* dengan VUF 2%



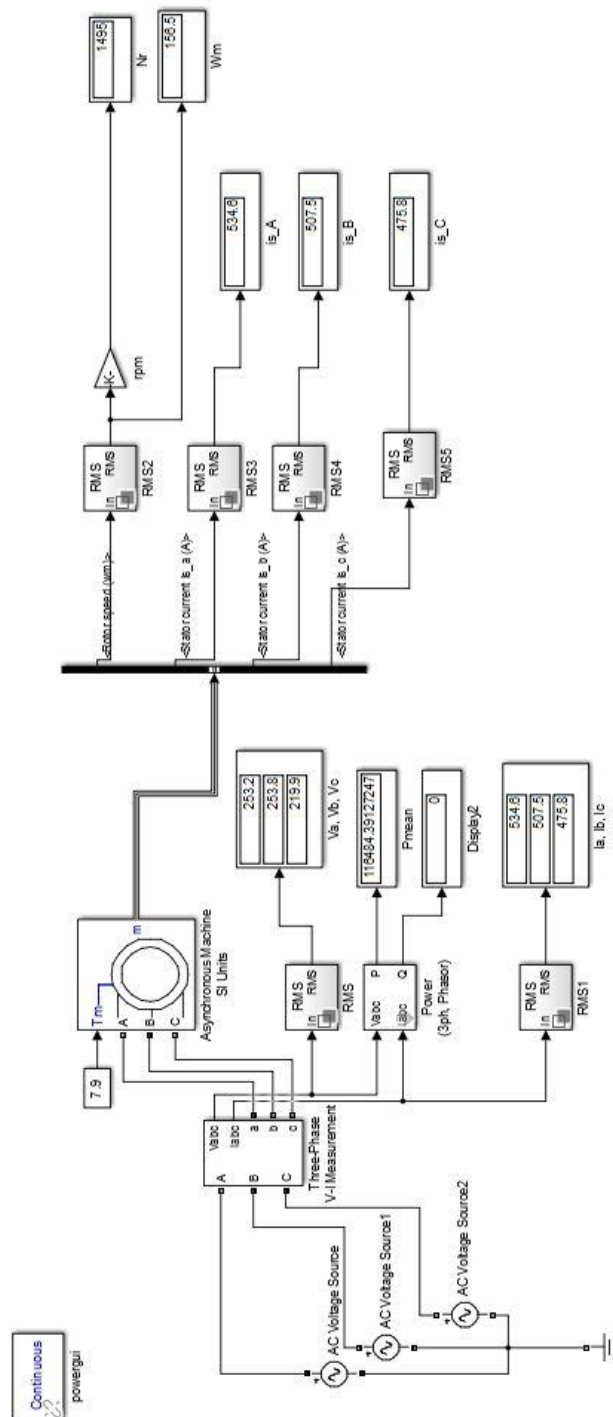
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-2phases* dengan VUF 3%



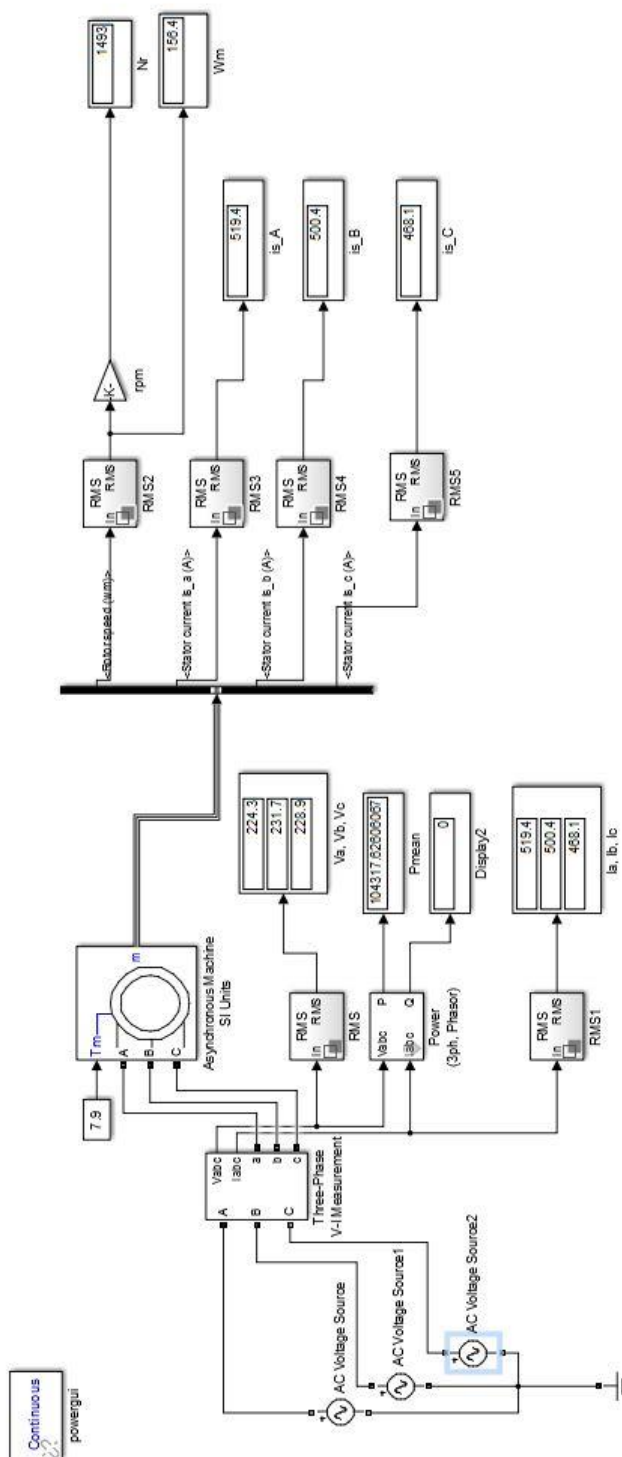
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-2phases* dengan VUF 4%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-2phases* dengan VUF 5%

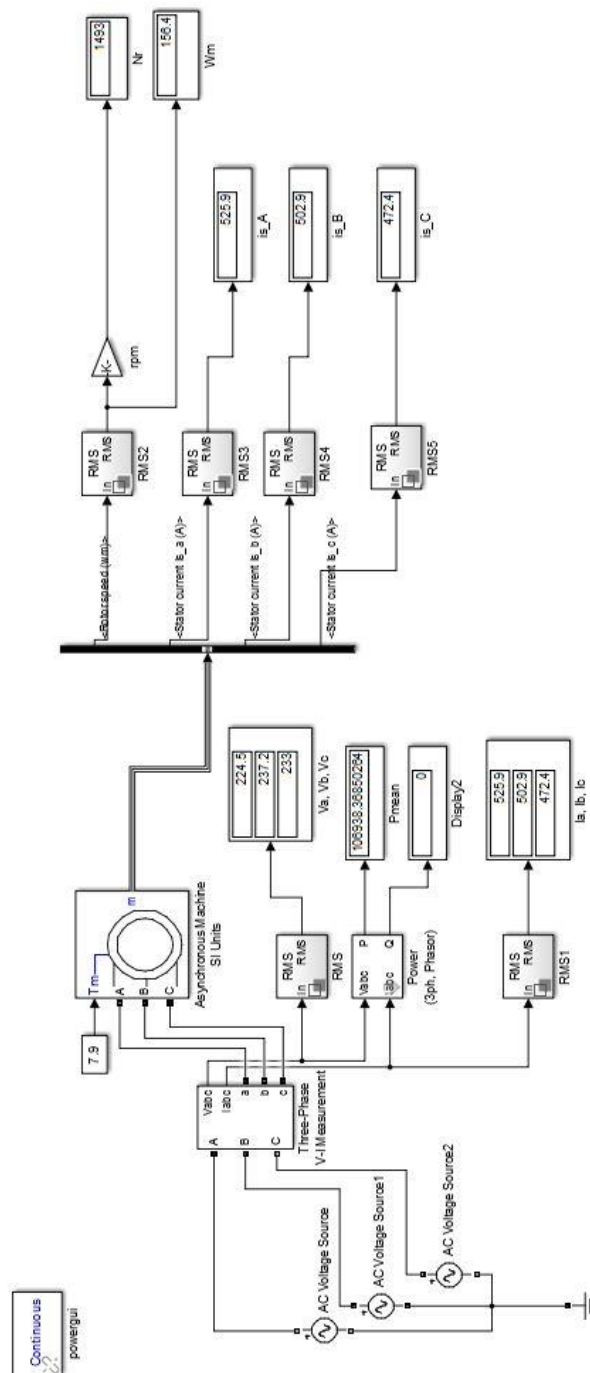


Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-3phases* dengan VUF 1%

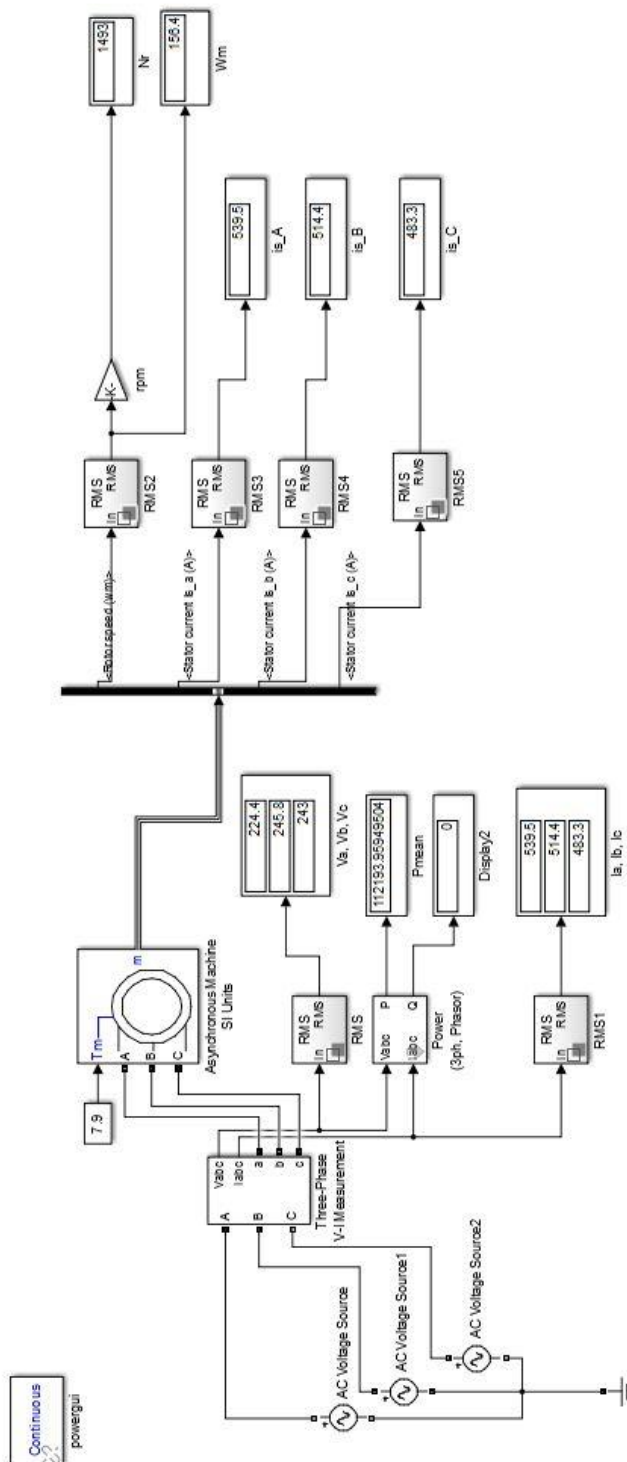




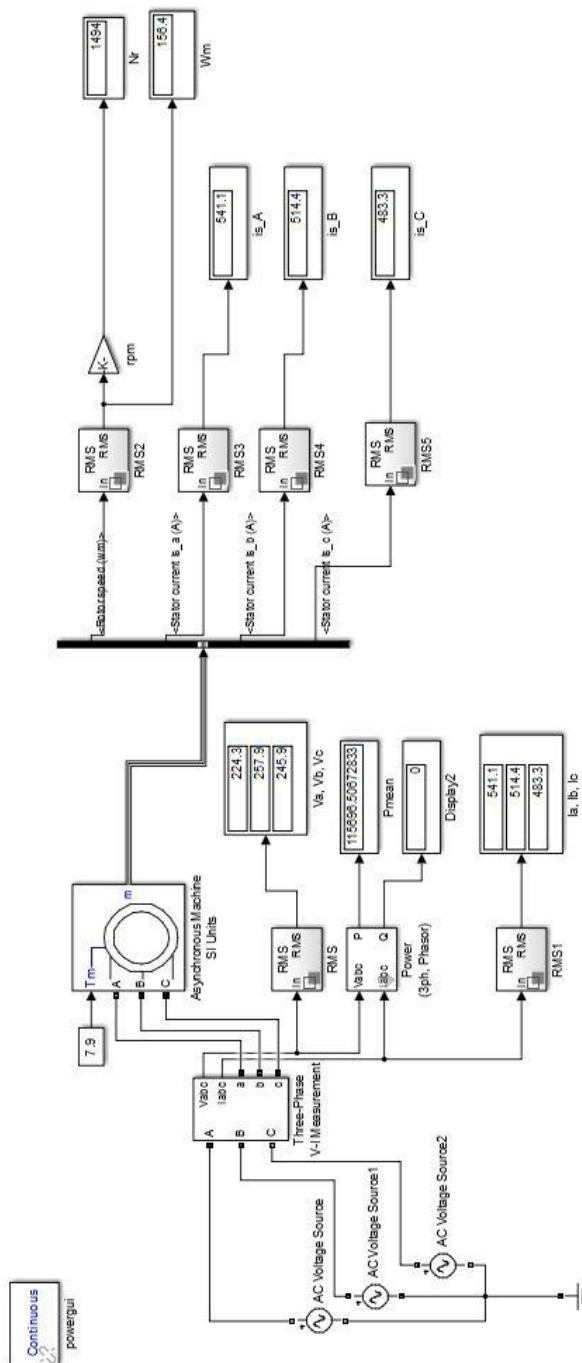
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-3phases* dengan VUF 2%



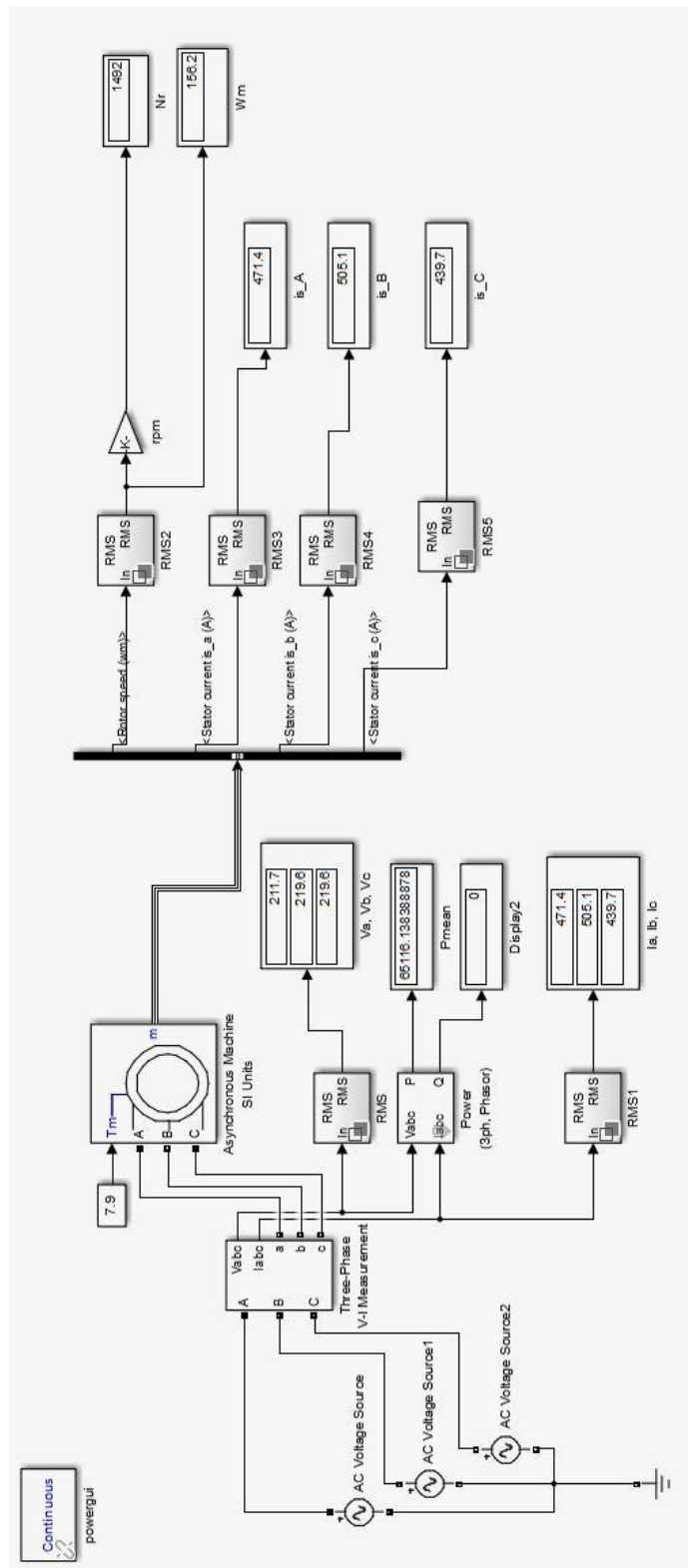
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-3phases* dengan VUF 3%



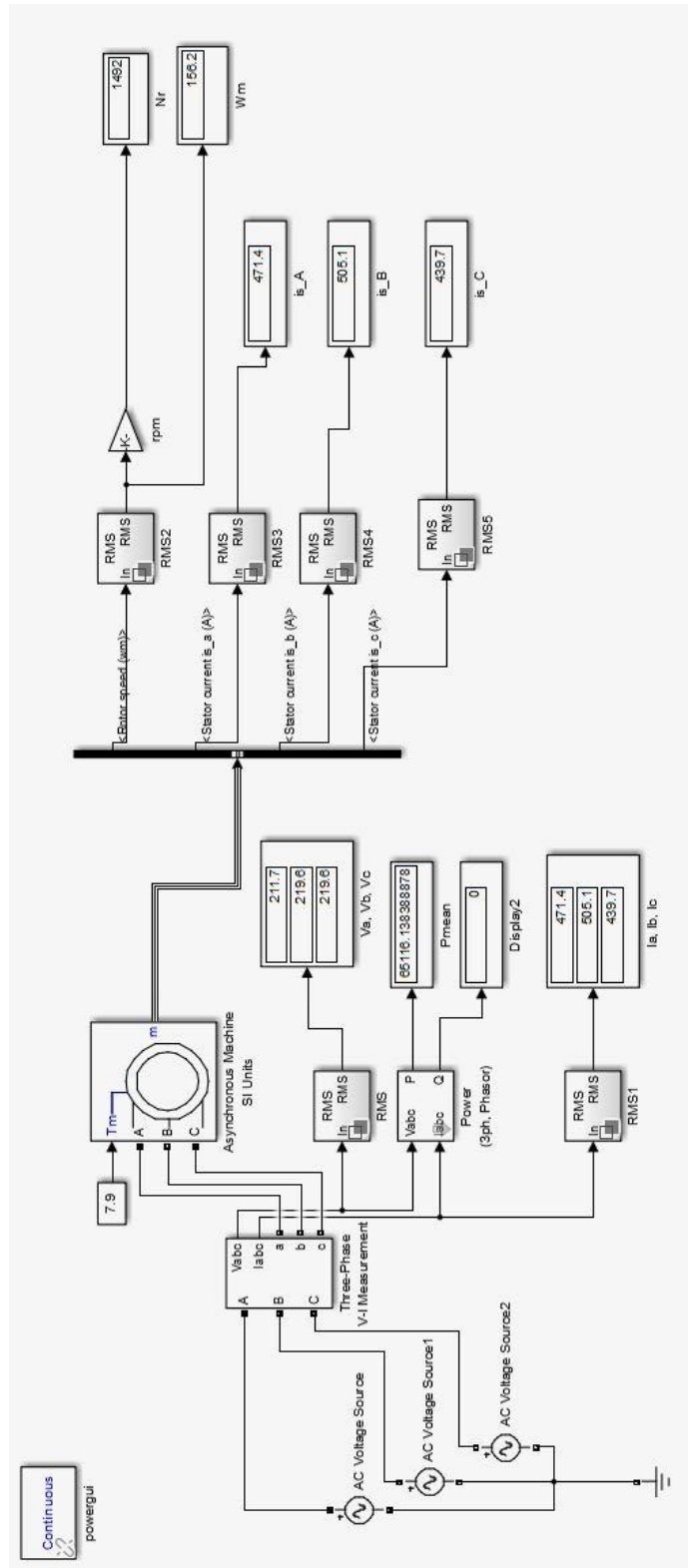
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Overvoltage-3phases* dengan VUF 5%



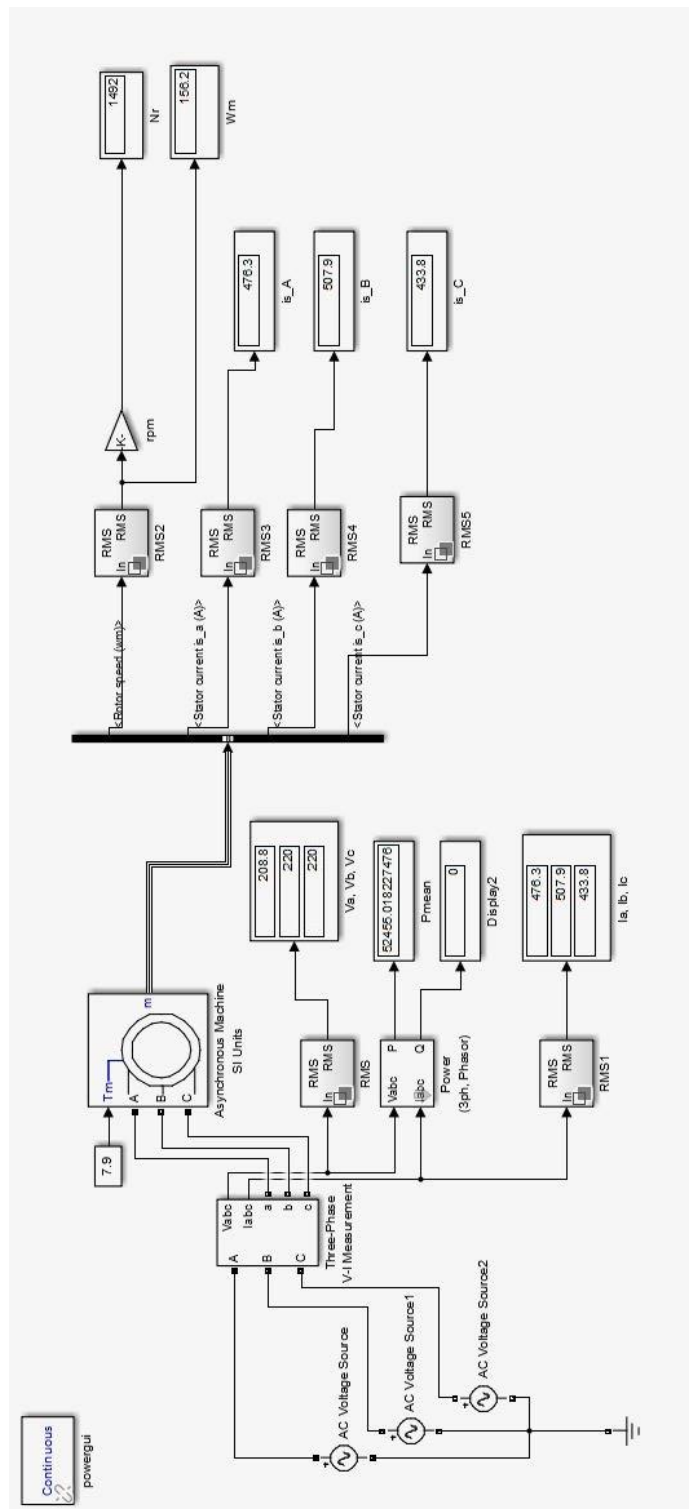
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 1%



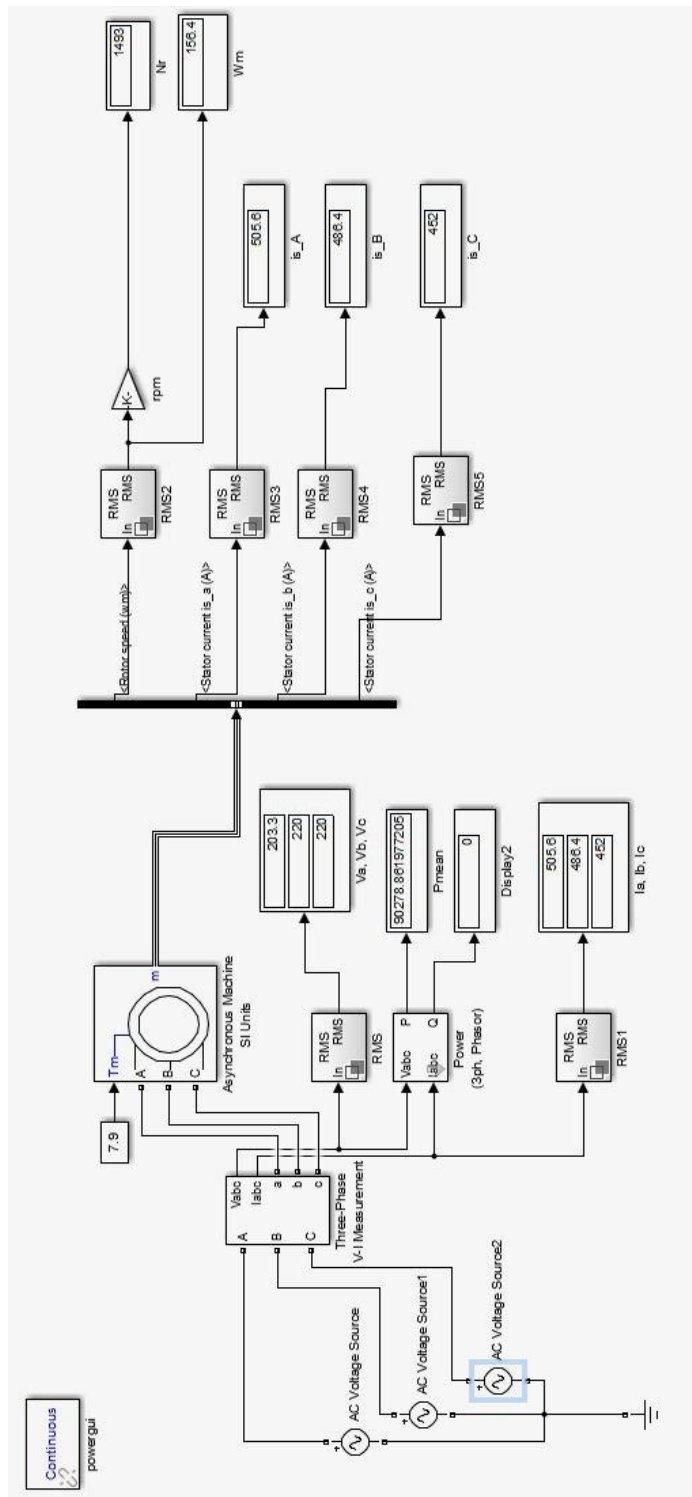
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 1%



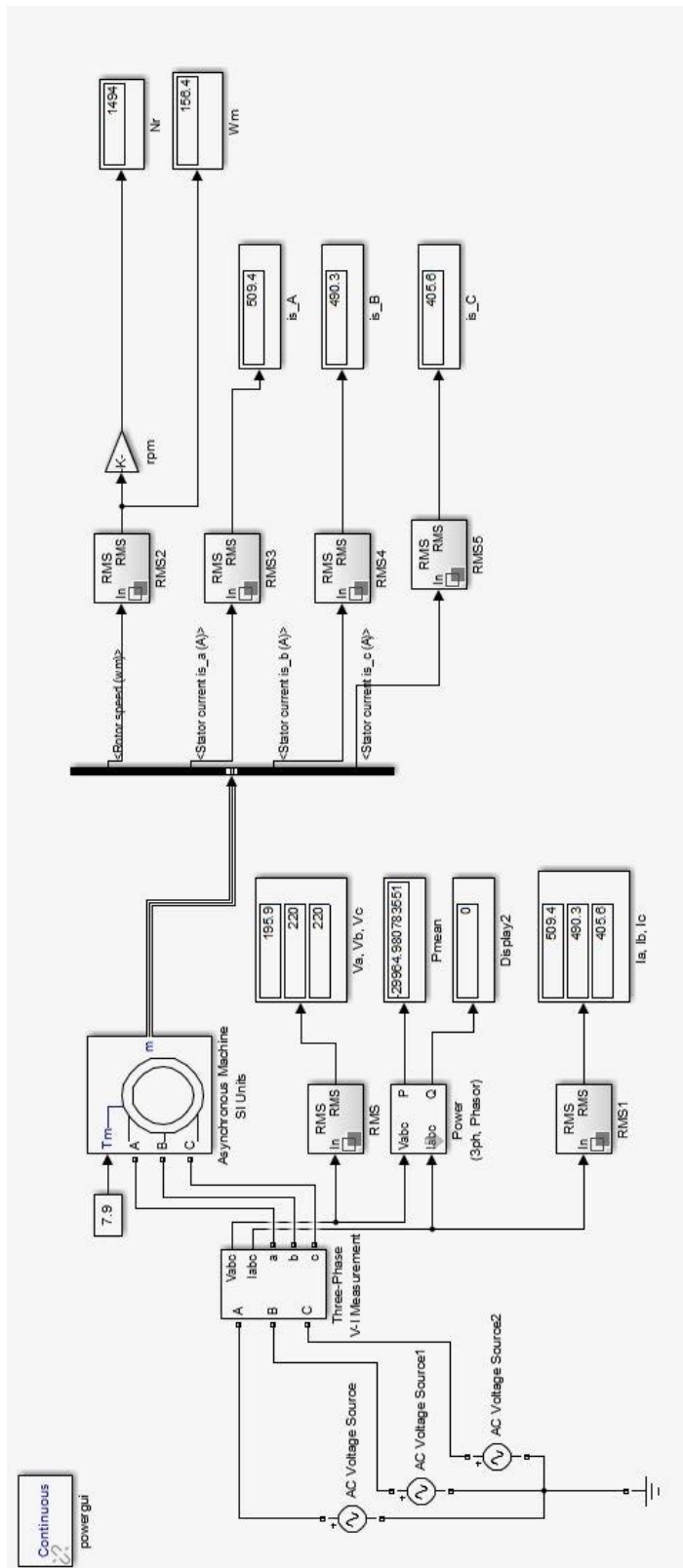
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 2%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 3%

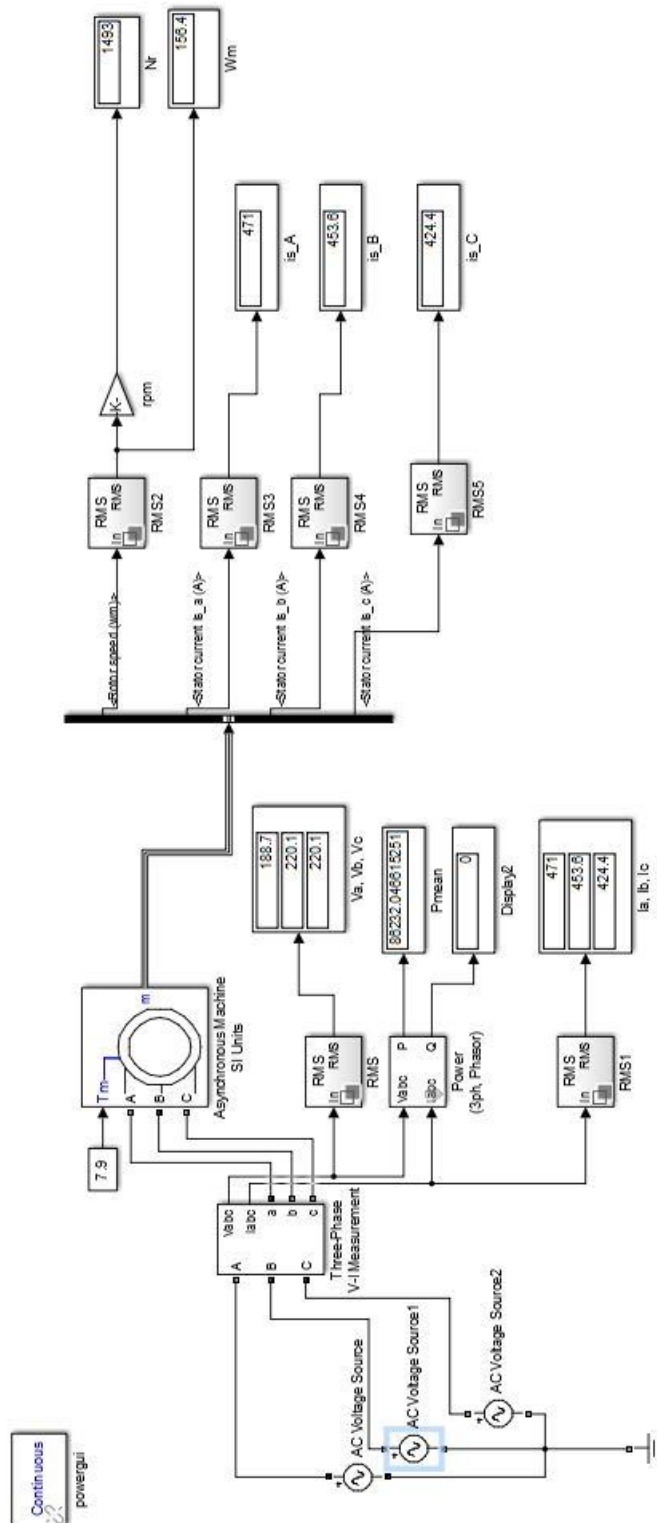


Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 4%

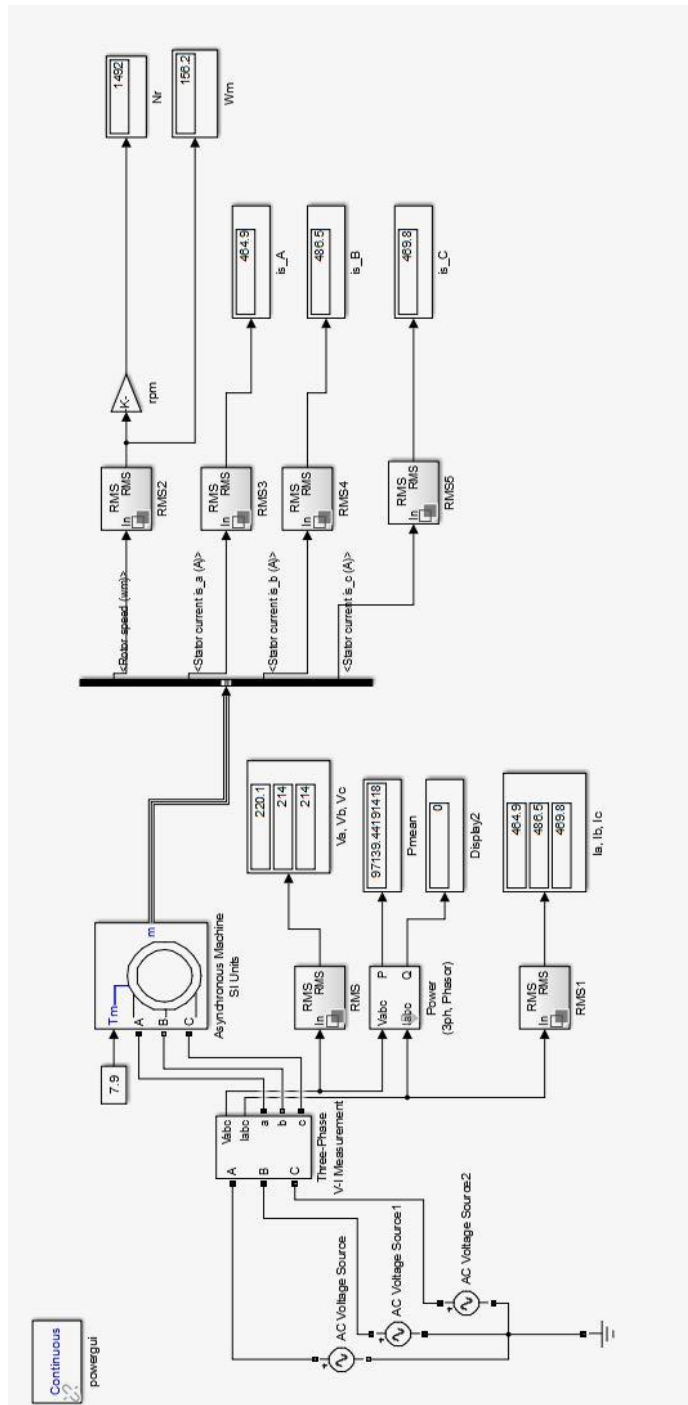




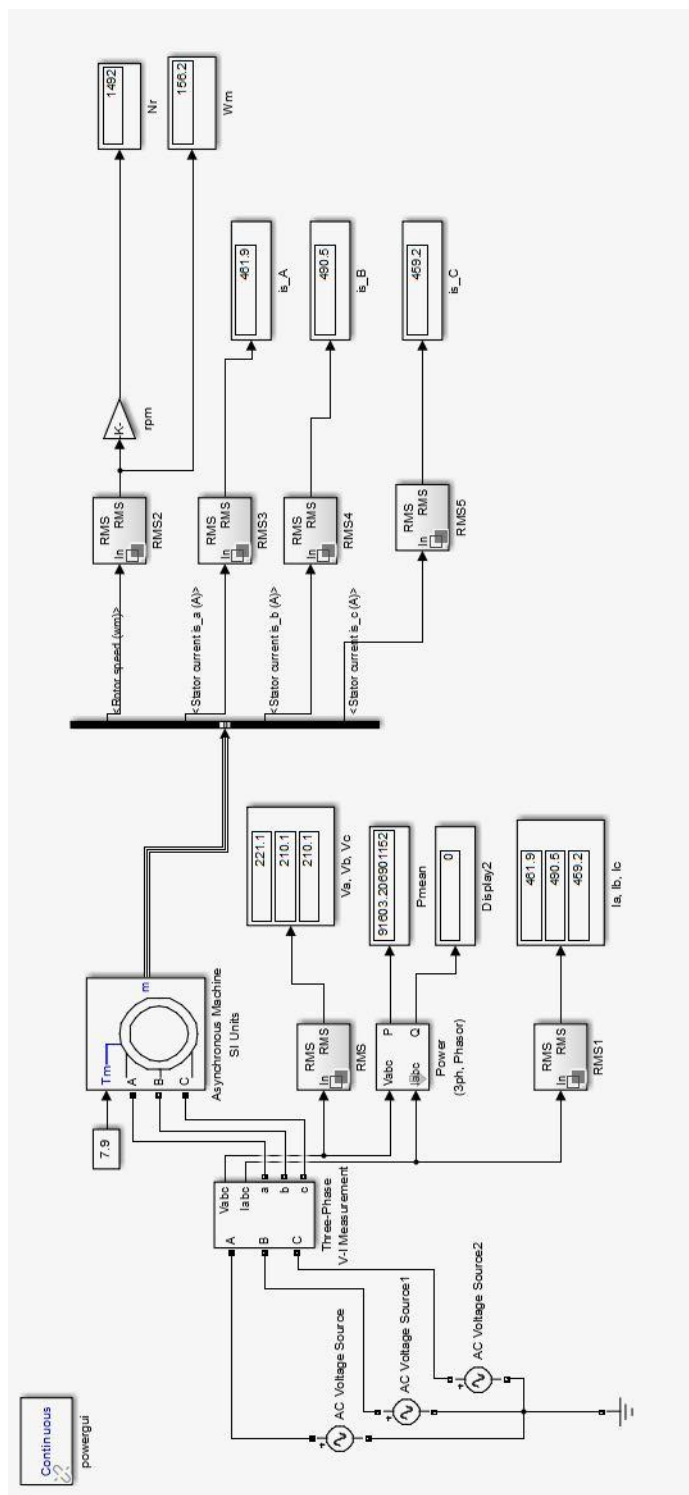
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-1phases* dengan VUF 5%



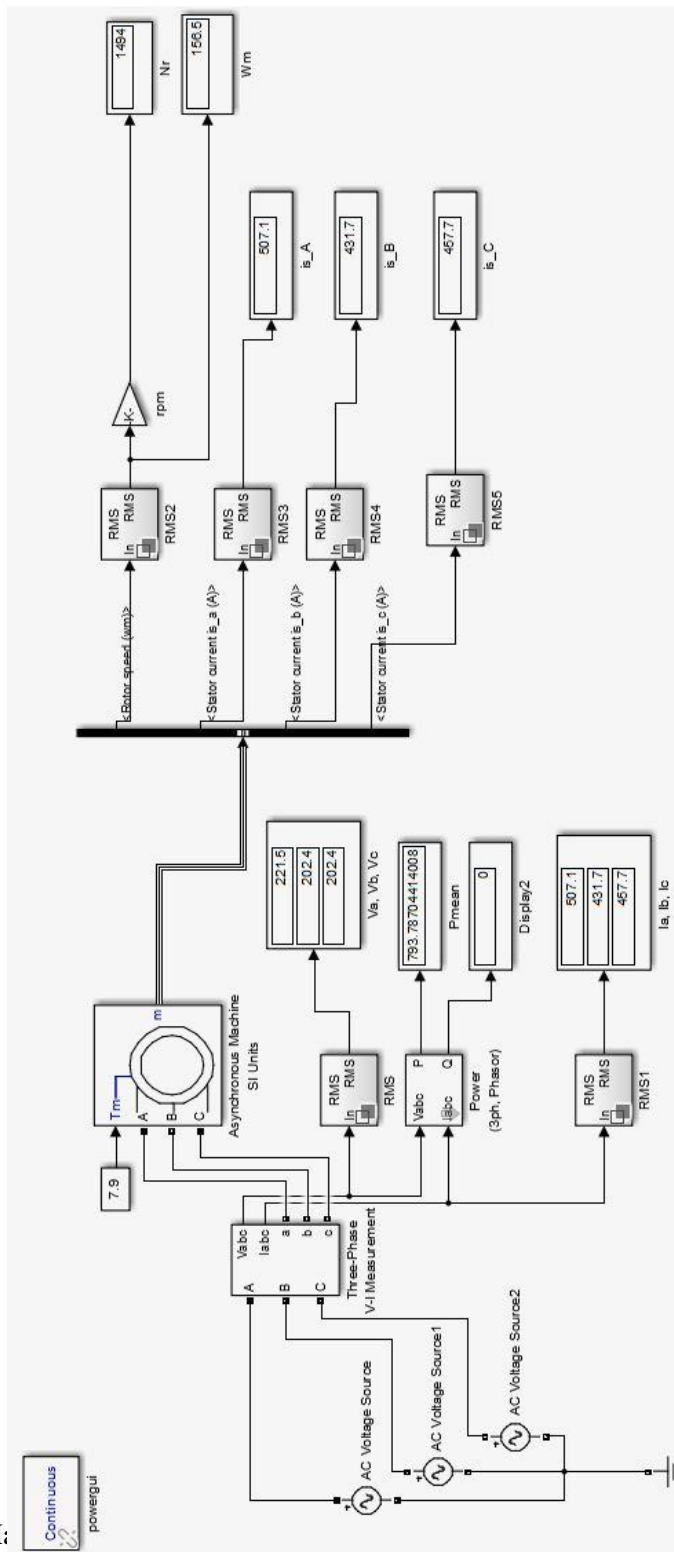
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-2phases* dengan VUF 1%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-2phases* dengan VUF 2%

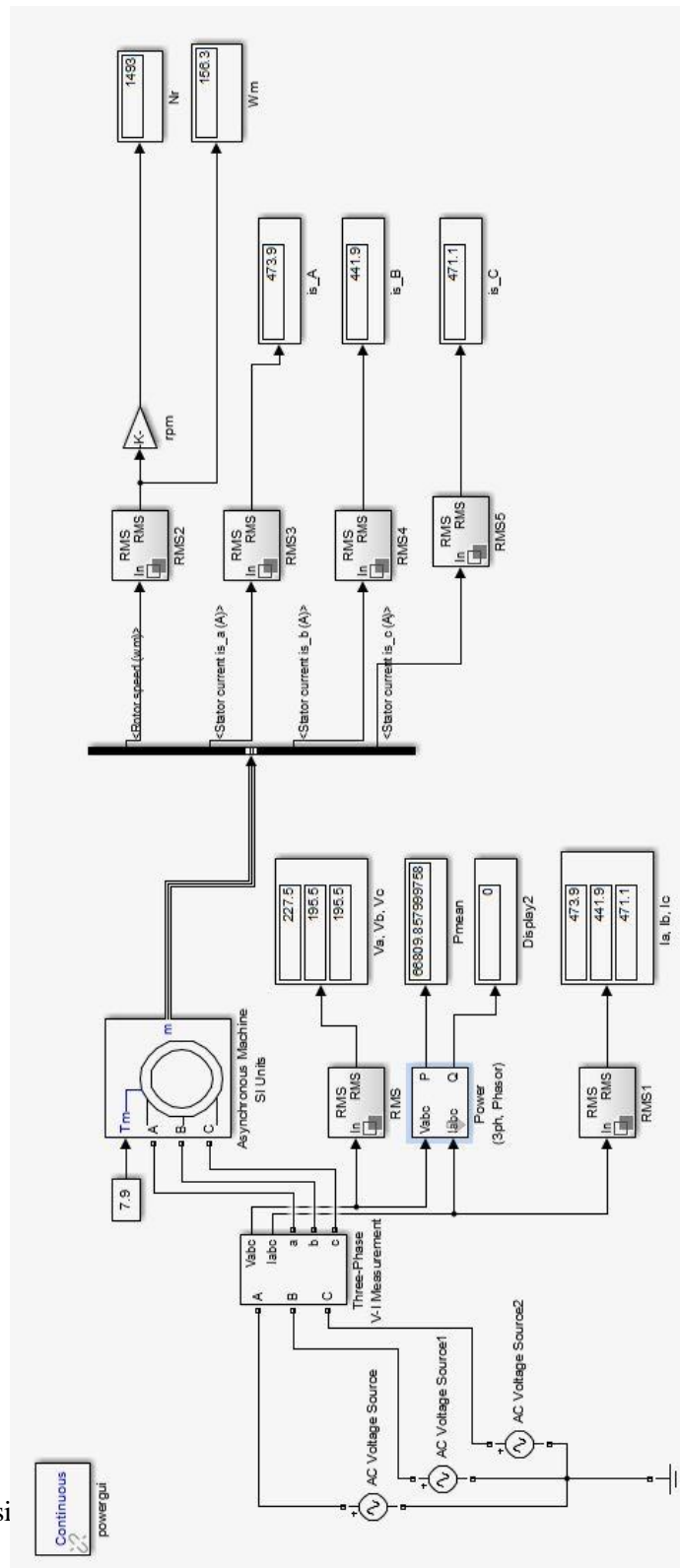


Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-2phases* dengan VUF 3%



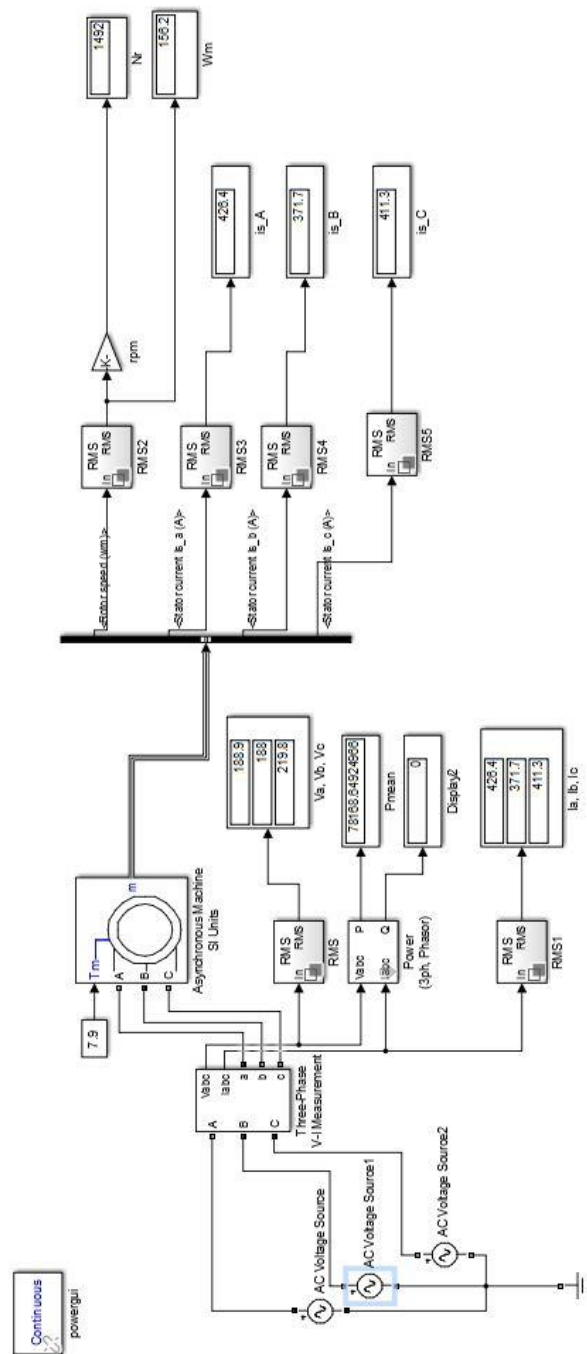
Lampiran Ha  
4%

es dengan VUF

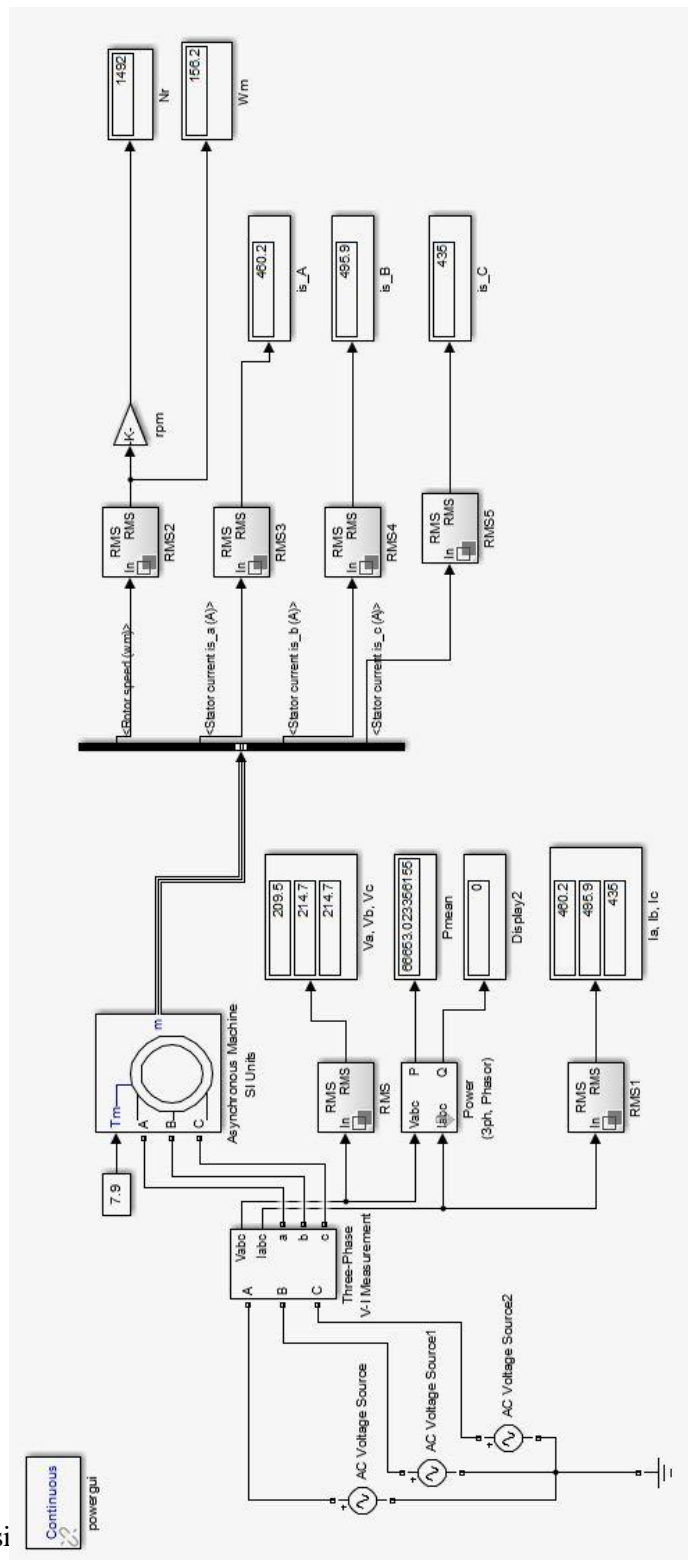


Lampiran Hasil  
5%

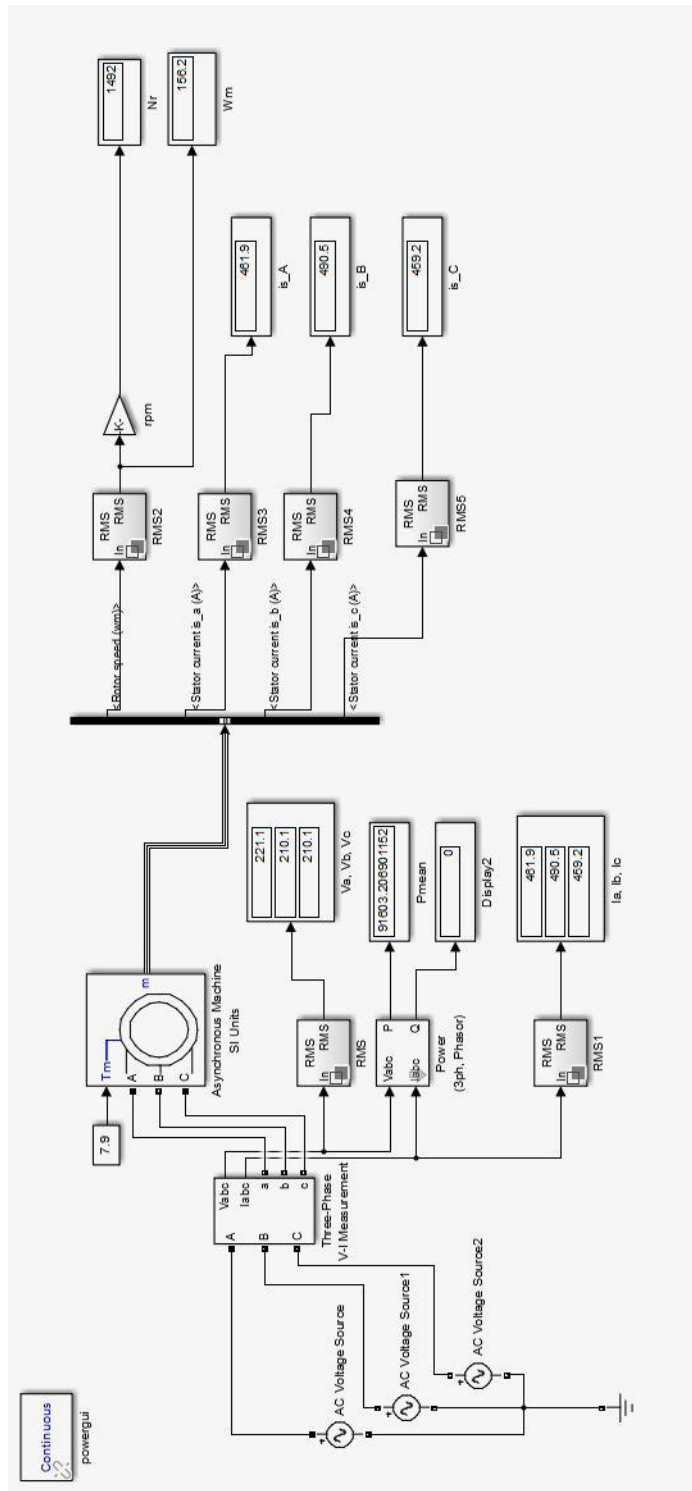
s dengan VUF



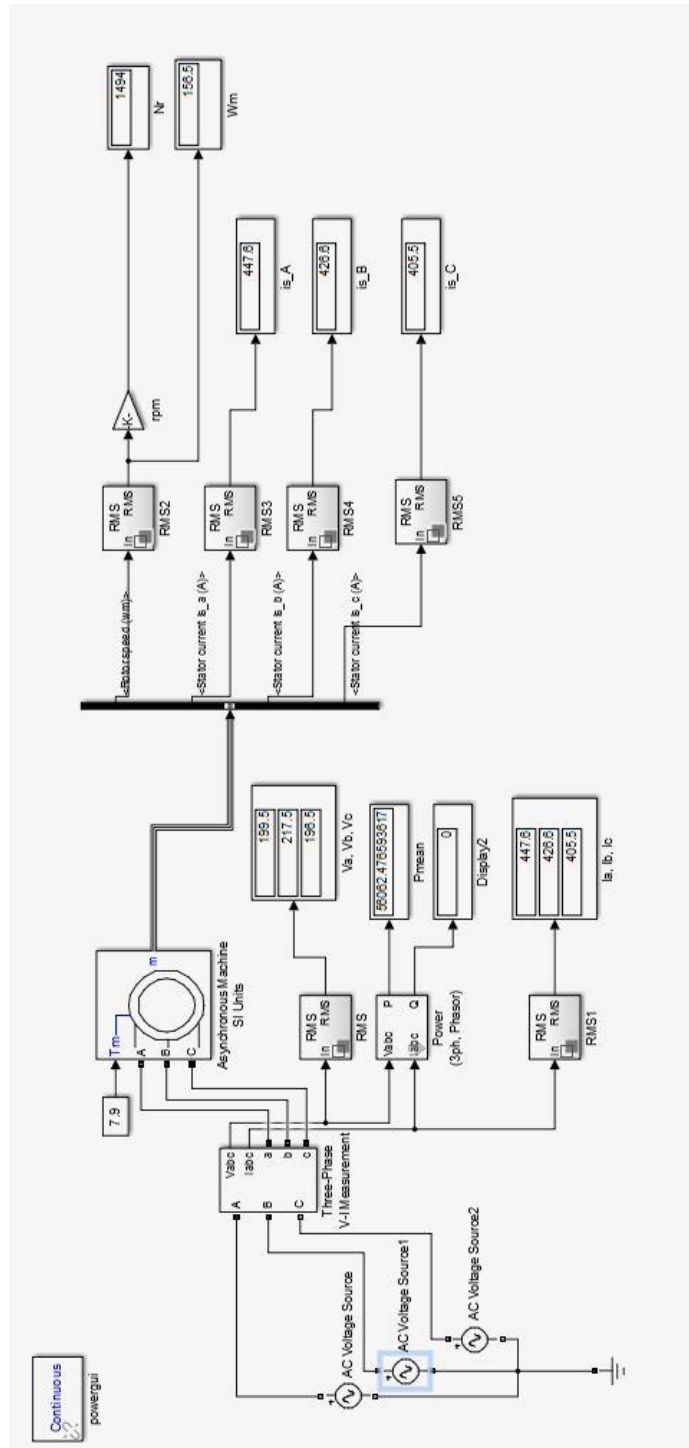
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-3phases* dengan VUF 1%



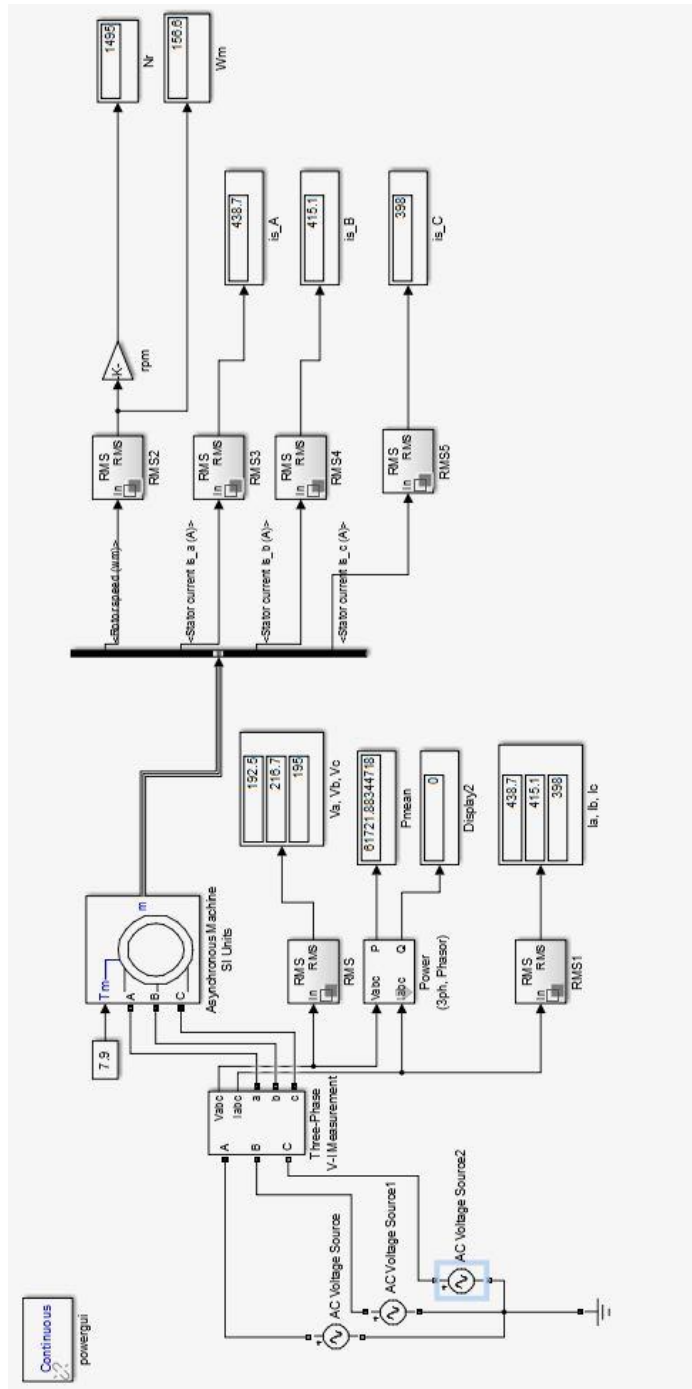




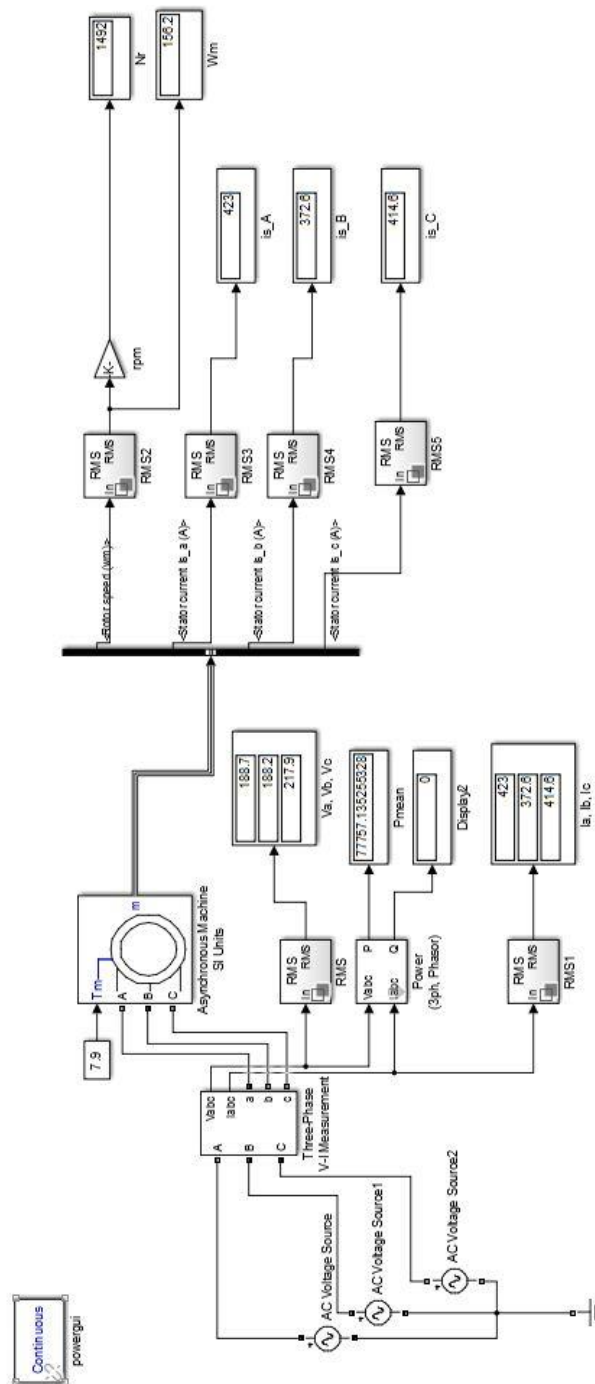
Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-3phases* dengan VUF 3%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-3phases* dengan VUF 4%



Lampiran Hasil Simulasi Simulink Matlab Kondisi *Undervoltage-3phases* dengan VUF 5%



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BIODATA PENULIS



Regita Indar Wardani, dilahirkan di Banyuwangi pada tanggal 15 September 1997, merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis merupakan alumni dari SD Negeri 4 Lateng, SMP Negeri 1 Banyuwangi, dan SMA Negeri 1 Glagah dengan program percepatan hanya 2 tahun. Penulis melanjutkan studi Strata 1 (S1) di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tahun 2014. Selama perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan akademik dan non akademik. Kegiatan akademik penulis yaitu sebagai grader praktikum *Transformator 3 phase* dalam matakuliah listrik perkapalan di *Marine Electrical and Automation System Laboratory*. Sedangkan kegiatan non-akademik penulis yaitu organisasi Marine

Technology and Inovation Club (METIC) sebagai METIC Development di tahun pertama, bergabung dengan BEM (Badan Eksekutif Mahasiswa) Fakultas Teknologi Kelautan pada tahun kedua sebagai Staff Department Riset dan Teknologi, pada tahun ketiga sebagai Bendahara Umum 1 di BEM (Badan Eksekutif Mahasiswa) Fakultas Teknologi Kelautan. Pengalaman kerja penulis pernah melakukan kerja praktek di PT DUMAS Shipyards, Surabaya dan PT. Pembangkit Jawa Bali (PJB) Unit Pembangkitan Cirata, Purwakarta

Regita Indar Wardani  
*Marine Engineering Department*  
Indaregitha15@gmail.com